

*
Колебания и волны.
Геометрическая и волновая оптика

Кузнецов Сергей Иванович
доцент кафедры
ОФ ЕНМФ ТПУ

Тема 8 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

8.1 Интерференция световых волн

8.2 Опыт Юнга

**8.3 Когерентность и
монохроматичность**

**8.4 Методы наблюдения
интерференции**

8.5 Интерференция в тонких пленках

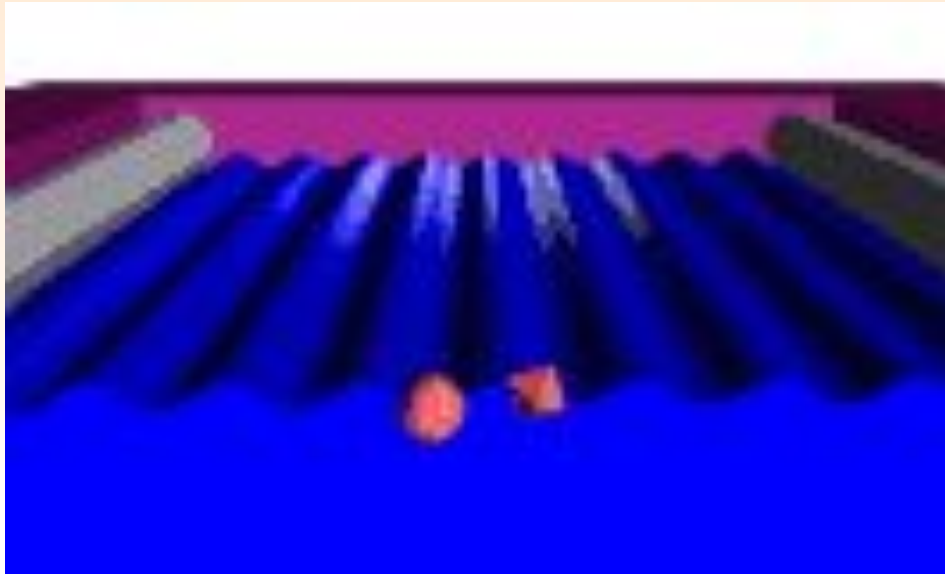
8.6 Применение интерференции света

Интерференция света (от лат. *inter* – взаимно, между собой и *ferio* – ударяю, поражаю) – **пространственное перераспределение энергии света при наложении двух или нескольких световых волн.**

Интерференция волн – одно из основных свойств волн любой природы (упругих, электромагнитных, в т.ч. световых и др.). Такие характерные волновые явления, как излучение, распространение и дифракция, тоже связаны с интерференцией.

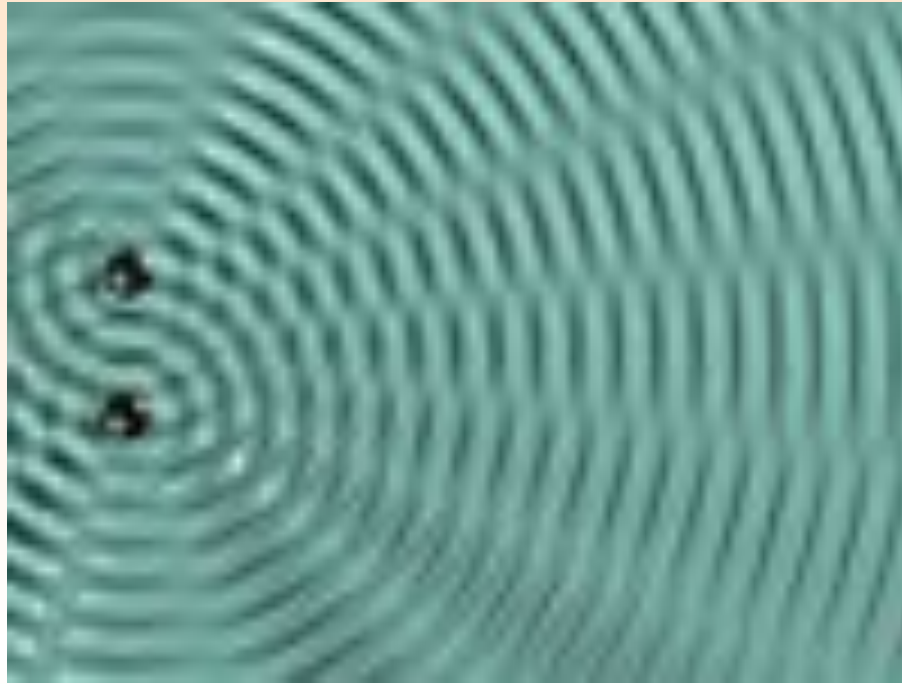
Интерференцией света объясняются окраска тонких масляных пленок на поверхности воды, металлический отлив в окраске крыльев насекомых и птиц, появление цветов побежалости на поверхности металлов, голубоватый цвет просветленных линз оптических приборов и пр.

Некоторые явления интерференции света исследовались еще И. Ньютоном в XVII в., но не могли быть им объяснены с точки зрения его корпускулярной теории. Правильное объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано в начале XIX в. Т. Юнгом и О. Френелем.



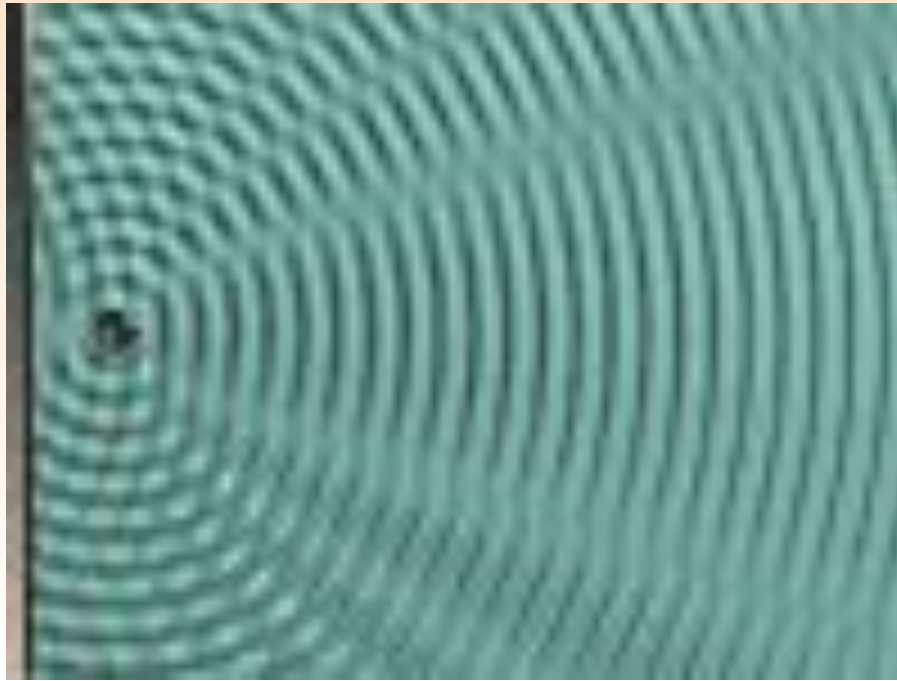
Интерференция двух волн на поверхности жидкости, возбуждаемых вибрирующими стержнями

Волны распространяются в противоположных направлениях и интерферируют с образованием стоячей волны. Красный шарик расположен в пучности стоячей волны и колеблется с максимальной амплитудой. Параллелепипед расположен в узле интерференционной картины и амплитуда его колебаний равна нулю (он совершает лишь вращательные движения, следуя наклону волны)



Интерференция поверхностных волн от двух точечных источников

В точках, для которых $r_2 - r_1 = \lambda (1/2 + n)$, поверхность жидкости не колеблется
(узловые точки (линии))



Интерференция круговой волны в жидкости с её отражением от стенки

Расстояние от источника до стенки r кратно целому числу полуволн, исходная круговая волна интерферирует с волной, отражённой от стенки. Согласно пр. Гюйгенса, **отражённая волна совпадает с той, которая бы возбуждалась фиктивным точечным источником, расположенным по другую сторону стенки симметрично реальному источнику.** Т.к. r кратно целому числу полуволн, то справа от источника на оси соединяющей фиктивный и реальный источник разность фаз будет кратна целому числу волн, и круговая волна накладывается **в фазе с волной**, отражённой от стенки, увеличивая высоту гребней в интерференционной картине



Интерференция круговой волны в жидкости с её отражением от стенки

Расстояние между точечным источником и стенкой кратно целому числу полуволн плюс четверть волны. При этом справа от источника круговая волна накладывается в противофазе с волной, отражённой от стенки. В результате в широкой полосе справа от источника колебания жидкости отсутствуют

8.1 Интерференция световых волн

Волновые свойства света наиболее отчетливо обнаруживают себя в *интерференции* и *дифракции*.

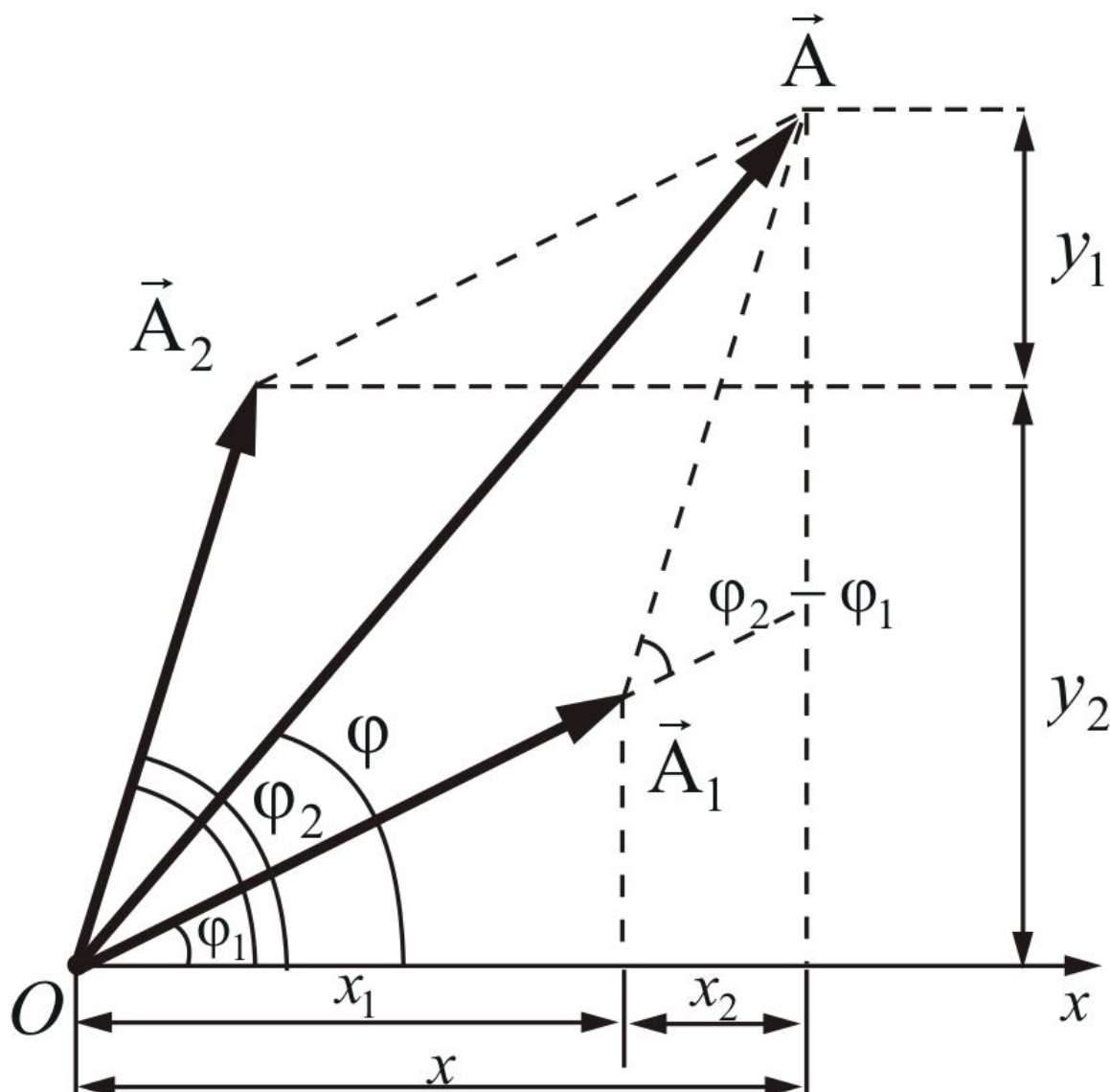
Пусть две волны одинаковой частоты, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad - \text{ амплитуда}$$



результатирующего колебания при сложении колебаний направленных вдоль одной прямой

Ox – опорная прямая

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Если разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ колебаний возбужденных волнами в некоторой точке пространства остается постоянной во времени, то такие волны называются когерентными.

В случае некогерентных волн разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ непрерывно изменяется.

Интенсивность световой волны J равна квадрату амплитуды A . Тогда суммарная интенсивность:

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7.2.2)$$

Последнее слагаемое в этом выражении

$2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ - *интерференционный член*.

В случае когерентных волн $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \text{const}$

$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$ $J > J_1 + J_2$; **в максимуме**,

$$J = 4J_1$$

где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$, интенсивность

$$J < J_1 + J_2; \text{ в минимуме } J = 0$$

Для некогерентных источников интенсивность результирующей волны всюду одинакова и, равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в отдельности:

$$J = J_1 + J_2 = 2J_1$$

Некогерентность естественных источников света обусловлена тем, что излучение тела складывается из волн, хаотически испускаемых многими атомами.

Фазы каждого *цуга волны, испускаемого отдельным атомом* никак не связаны друг с другом. *Атомы излучают хаотически.*

*Периодическая последовательность горбов и впадин волны и образующиеся в процессе акта излучения одного атома, называется **цугом волн** или **волновым цугом**.*

Процесс излучения одного цуга атома длится 10^{-8} с.

Длина цуга $l = ct = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} = 3$ м

В одном цуге укладывается примерно 10^7

13

ДЛИН ВОЛН.

Одной из важных характеристик наблюдаемой интерференционной картины является **видность V** , которая характеризует контраст интерференционных полос:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

где I_{\max} и I_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения интенсивности в интерференционной картине.

При интерференции **монохроматических** волн **видность V** зависит **только от соотношения интенсивностей интерферирующих пучков света** :

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$$

Рассмотрим интерференцию двух когерентных волн:

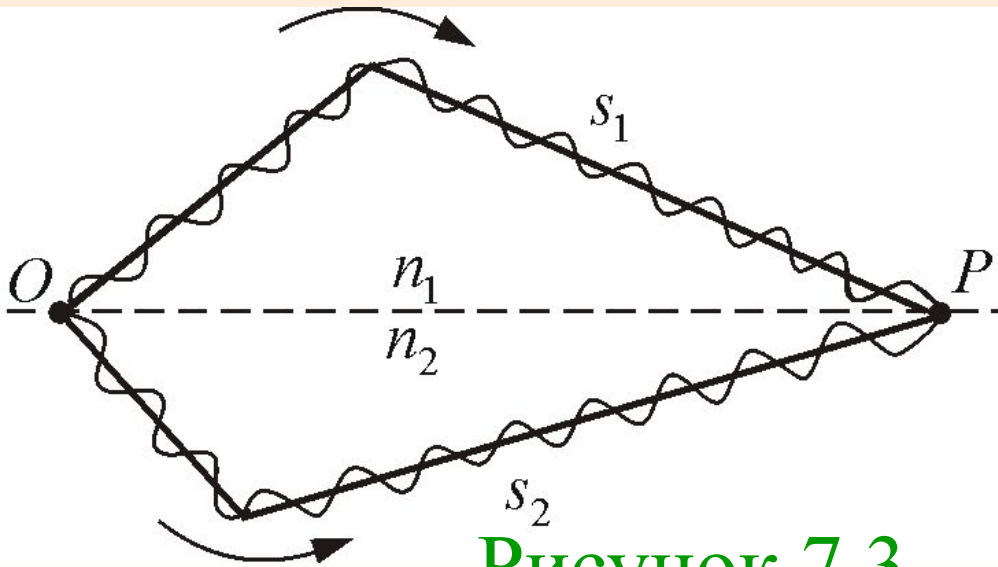


Рисунок 7.3

Первая волна

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left(t - \frac{s_1}{v_1} \right)$$

вторая

$$x_2 = A_2 \cos \omega \left(t - \frac{s_2}{v_2} \right)$$

Разность фаз двух когерентных волн - $\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$

Оптическая разность хода -

$$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$$

L – оптическая длина пути; **s** – геометрическая длина пути; **n** – показатель преломления среды.

Условие максимума и минимума интерференции:

• *Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн*

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7.2.3)$$

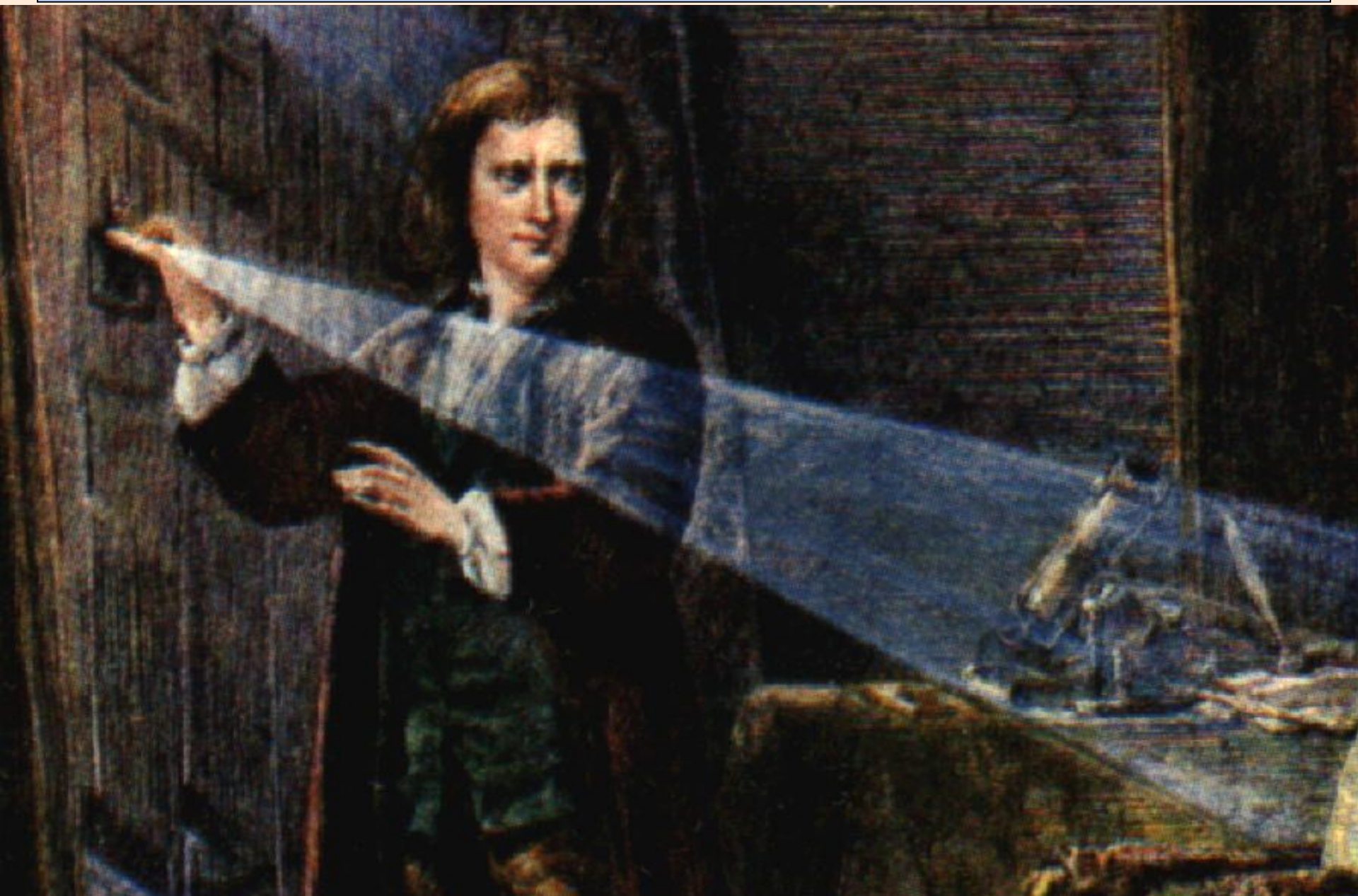
- условие интерференционного максимума.

• *Если оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн*

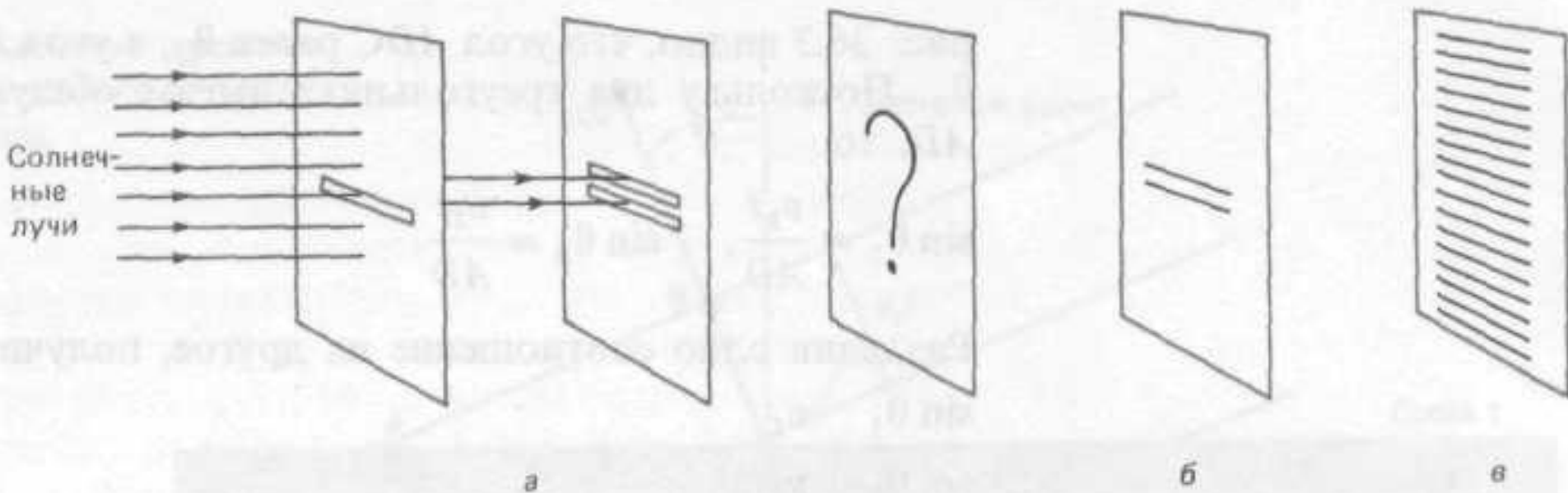
$$\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7.2.4)$$

- условие интерференционного минимума.

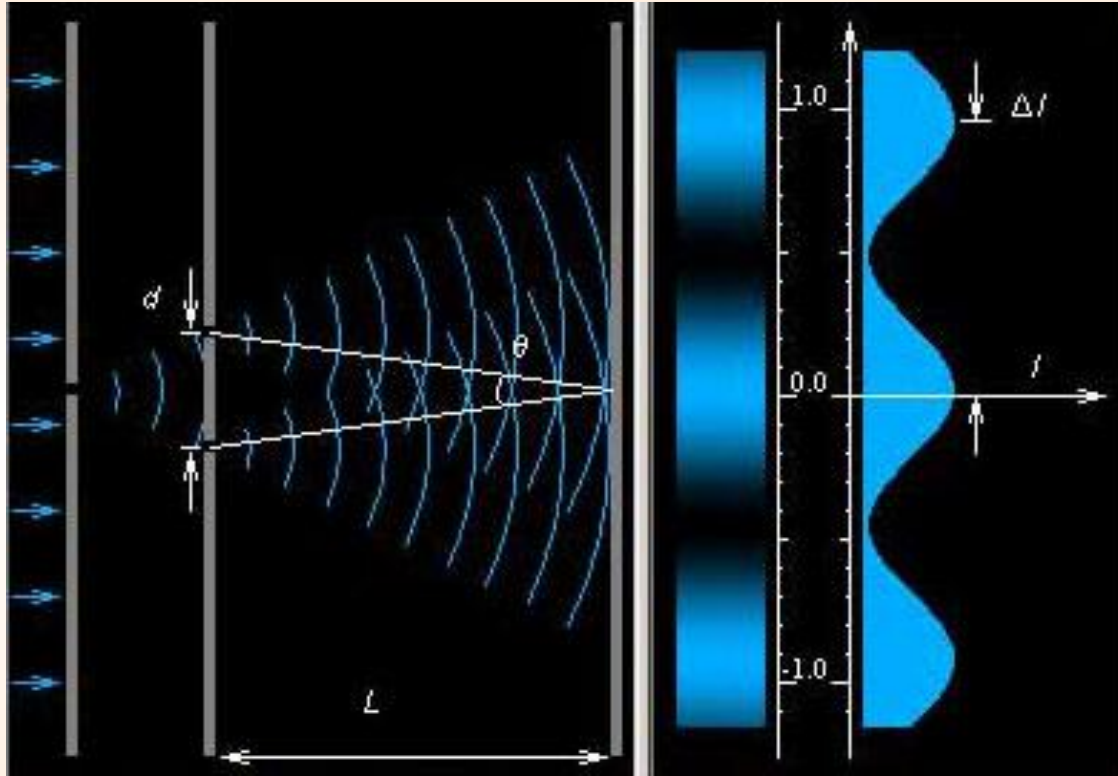
8.2 Опыт Юнга



Опыт Юнга



Классический интерференционный опыт Юнга



Параллельный пучок света падает на экран с небольшим отверстием. Пройдя через отверстие, свет доходит до второго экрана, в котором проделаны две щели. Когерентные пучки, излучаемые каждой из щелей, интерферируют на третьем экране.

Опыт Юнга

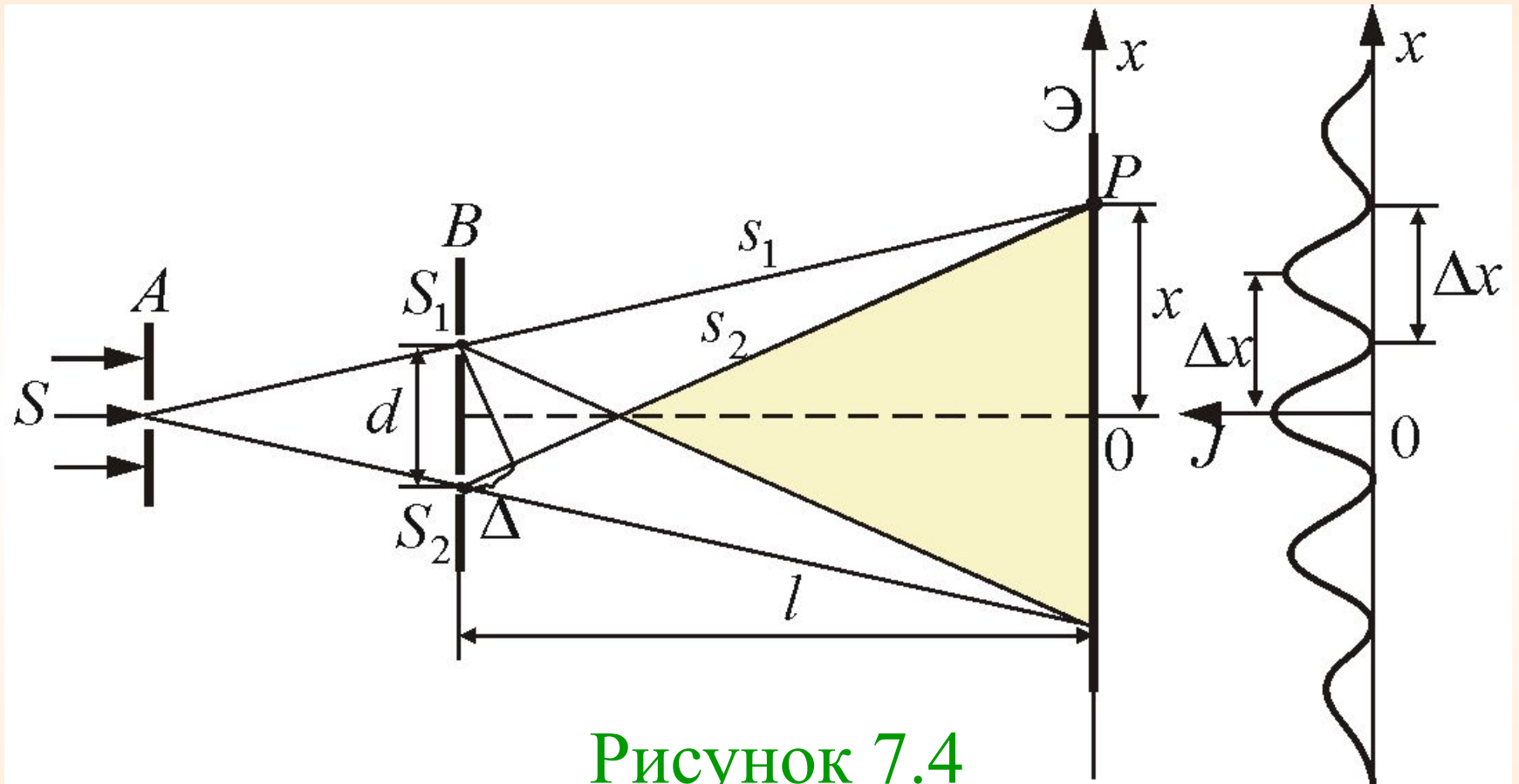
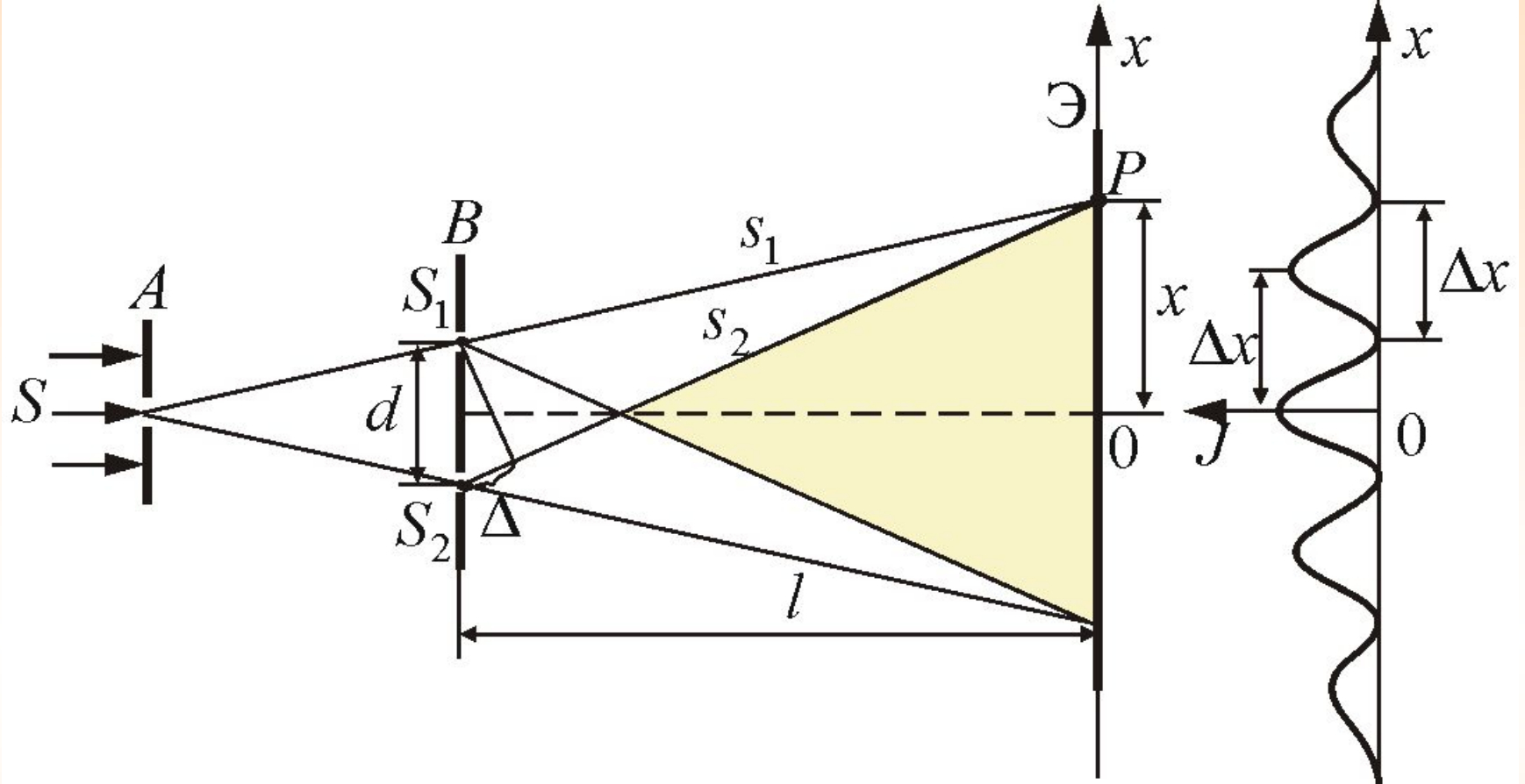


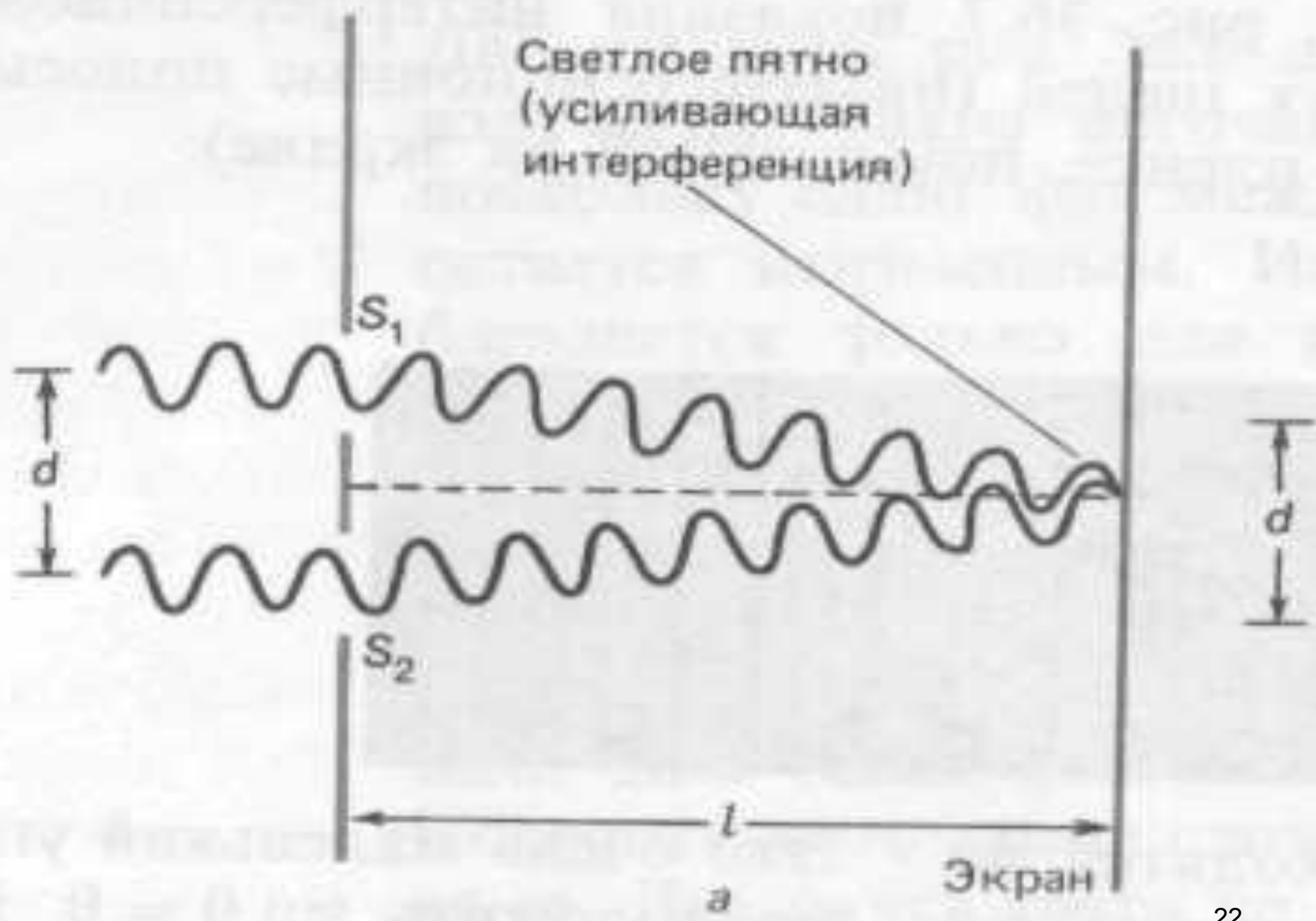
Рисунок 7.4

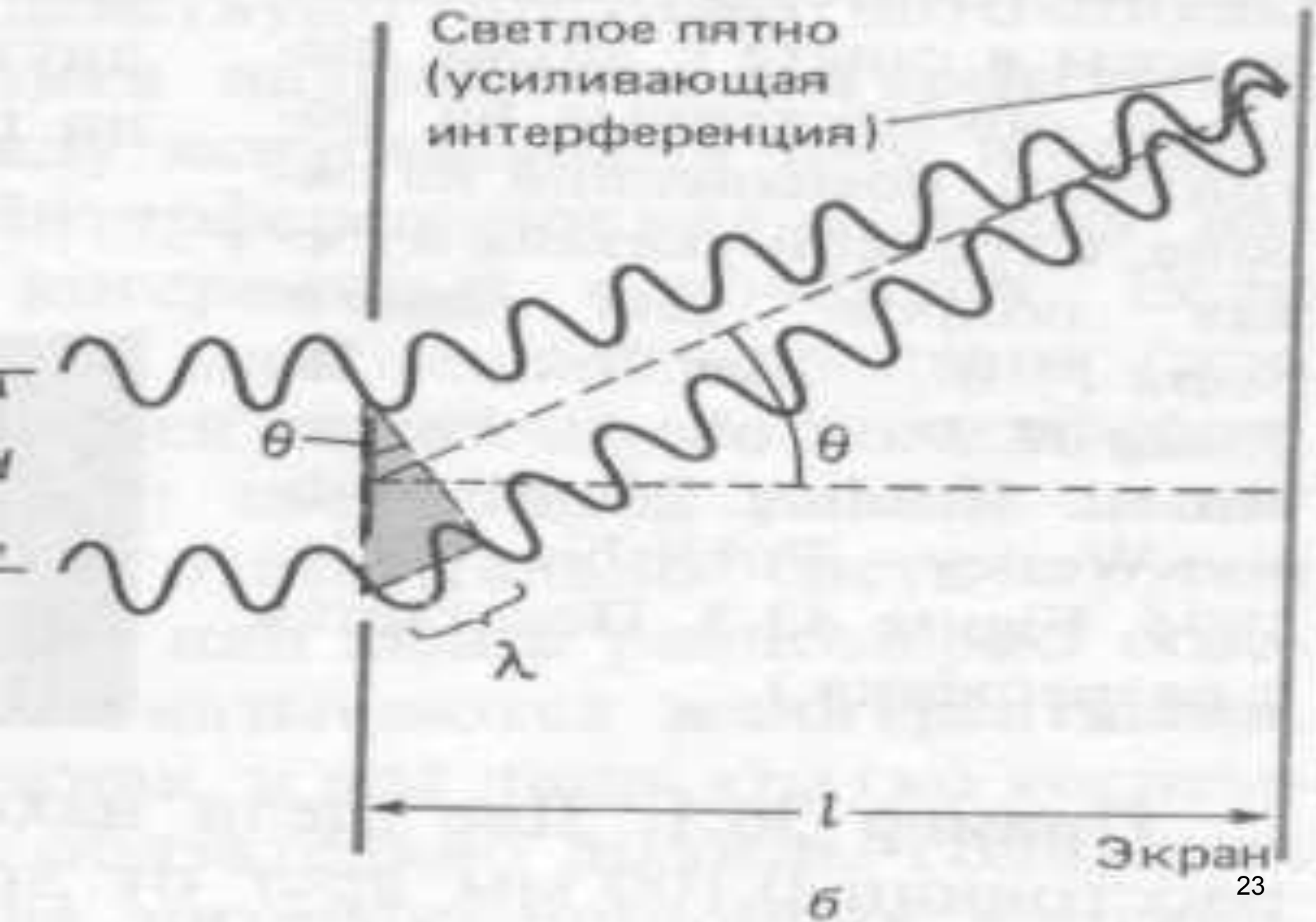
Расстояние l от щелей, причем $l \gg d$

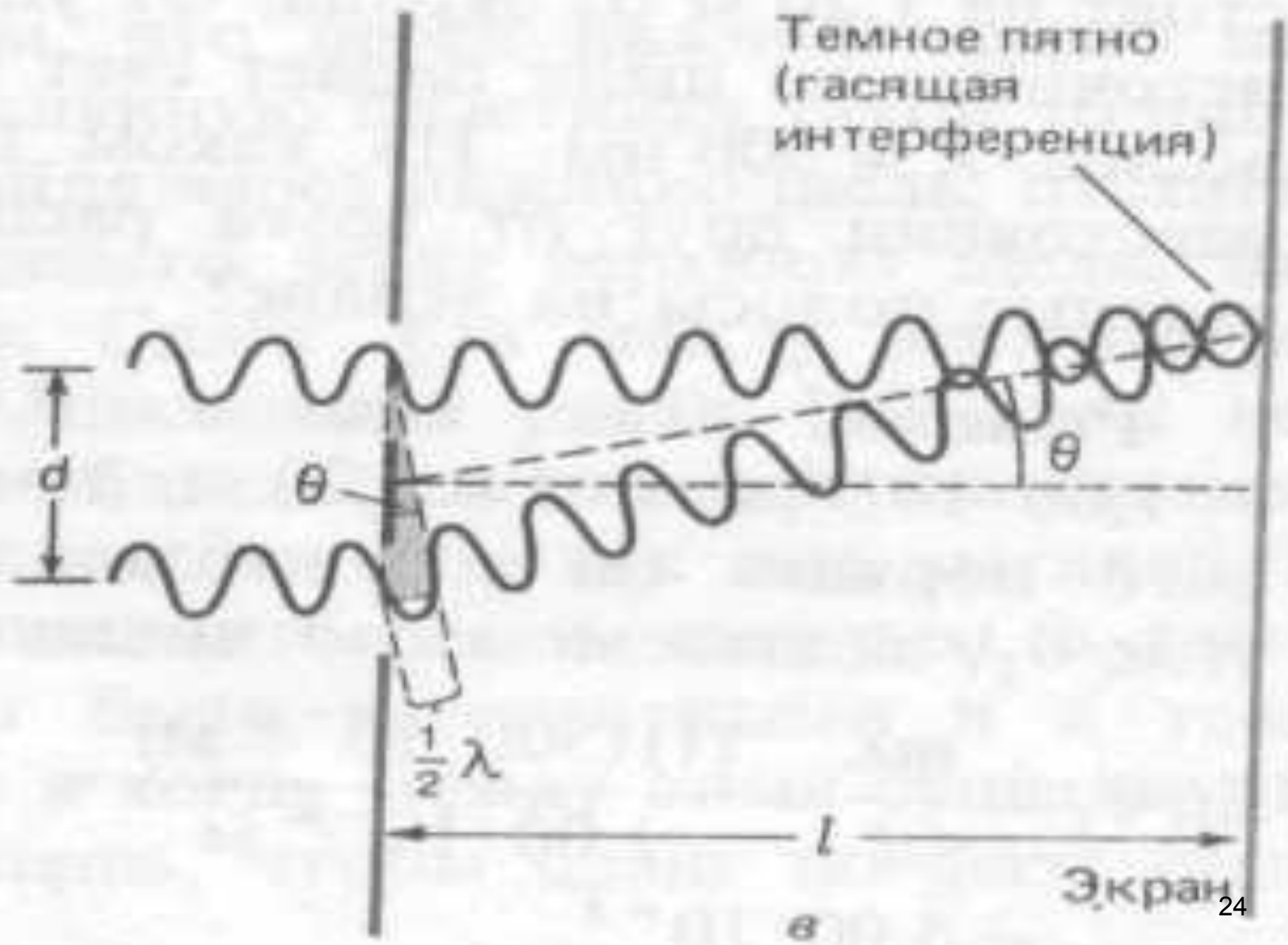
Показатель преломления среды – n .

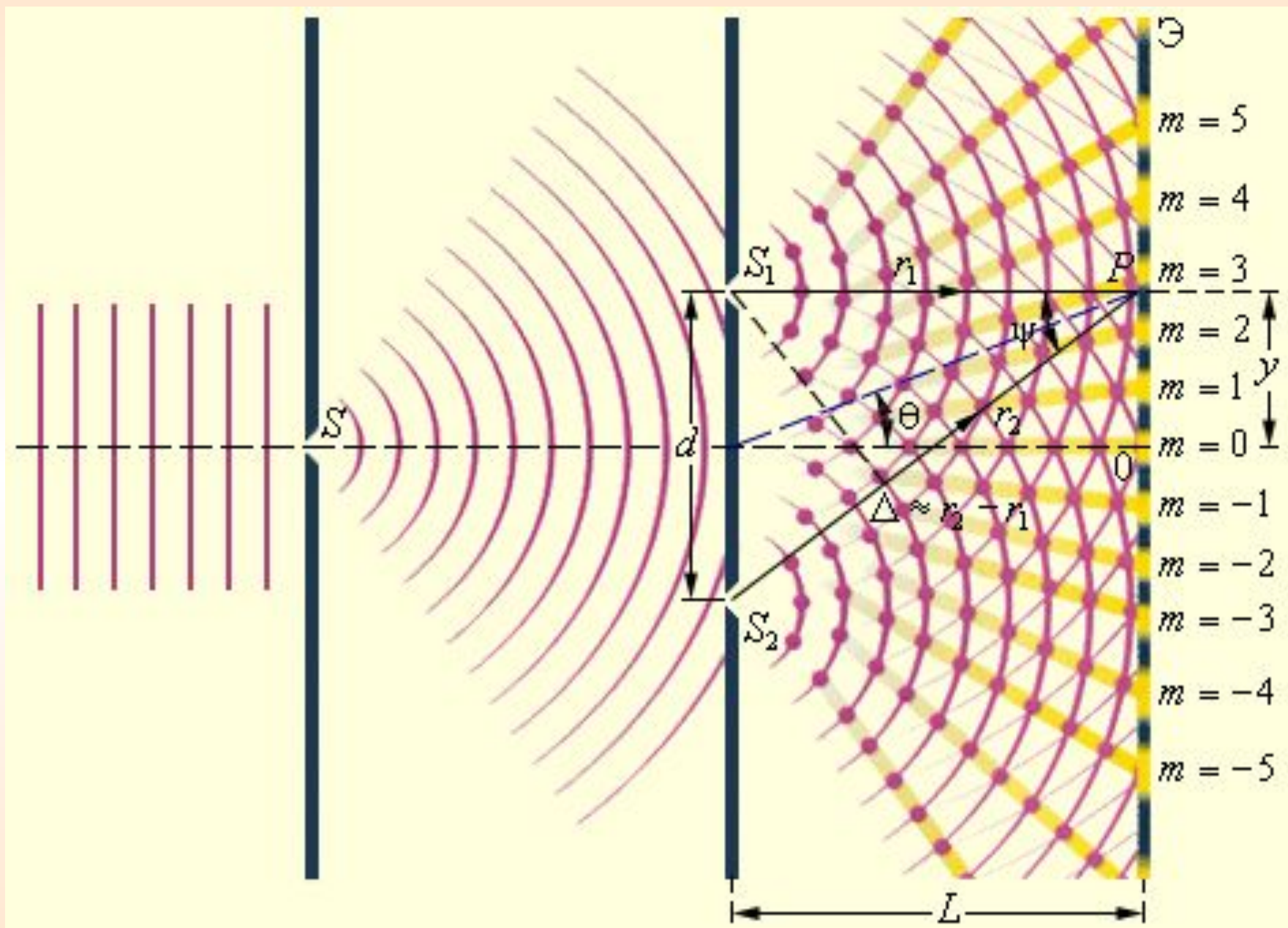


Главный максимум, соответствующий $m = 0$ проходит через точку O . Вверх и вниз от него располагаются максимумы (минимумы) первого ($m = 1$), второго ($m = 2$) порядков, и т. д.









Максимумы интенсивности будут

наблюдаться **в координатах:**

$$x_{\max} = \pm \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

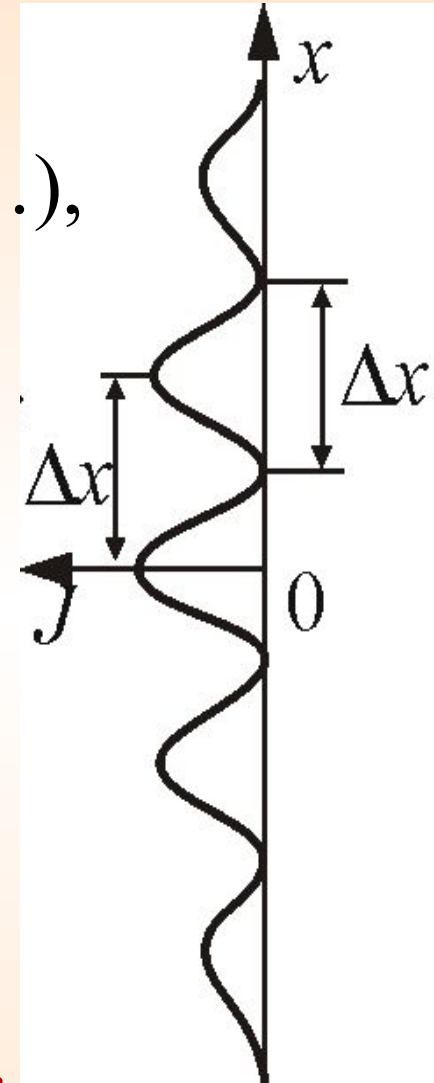
а **минимумы – в координатах:**

$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{l}{d} \lambda_0$$

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) равно

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0$$

- ширина интерференционной полосы.



Измерив Δx , зная l и d , можно вычислить длину волны λ . Именно так вычисляют длины волн разных цветов в спектроскопии.

8.3 Когерентность и монохроматичность

Необходимым условием интерференции волн является их *когерентность*, т.е. согласованное протекание *во времени и пространстве* нескольких колебательных или волновых процессов.

Этому условию удовлетворяют *монохроматические волны* – *волны одной определенной и строго постоянной частоты*.

Волну можно приближенно считать *монохроматической* только в течение времени

$$\Delta t \ll \tau_{\text{ког}} = \frac{\pi}{\Delta\omega} \quad (7.4.1)$$

где $\tau_{\text{ког}}$ – *время когерентности*

За промежуток времени $\tau_{\text{ког}}$ разность фаз колебаний изменится на π .

Время когерентности – время, по истечению которого разность фаз волны в некоторой, но одной и той же точке пространства, изменяется на π .

$$l_{\text{КОГ}} = \nu \tau_{\text{КОГ}} = \frac{\pi \nu}{\Delta \omega} \quad (7.4.2)$$

где $l_{\text{КОГ}}$ – *длина когерентности* (длина гармонического цуга, образующегося в процессе излучения одного атома) – *расстояние между точками, разность фаз в которых π .*

Когерентность колебаний которые совершаются в одной и той же точке пространства, определяемая степенью монохроматичности волн, называется временной когерентностью.

Можно показать ,что

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$$

- чем шире интервал частот, представленных в данной волне, тем меньше время когерентности.

Предельный наблюдаемый порядок интерференции

$$m_{\text{пред}} = \frac{\omega}{\Delta\omega} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

- число наблюдаемых интерференционных полос возрастает при уменьшении спектрального интервала.

Пространственная когерентность

Два источника, размеры и взаимное расположение которых позволяют наблюдать интерференцию, называются пространственно-когерентными.

Радиусом когерентности (или длиной пространственной когерентности) называется максимальное, поперечное направлению распространения волны расстояние, на котором возможно проявление интерференции.

$$\rho_k = \frac{\lambda}{\theta}$$

ρ_k – радиус пространственной когерентности;
 λ – длина волны;
 θ – угловой размер источника.

Критерий наблюдения интерференции при протяженном источнике:

$$b \leq b_{\max} = \frac{\lambda}{\Omega}$$

- интерференционные схемы с большой апертурой требуют источников малых размеров.

b - допустимый размер источника;

λ - длина волны;

Ω - *апертура интерференции* – угол между выходящими из источника интерферирующими лучами.

Условия пространственной когерентности двух волн

1) постоянная во времени разность фаз:

$$\omega_1 t + \varphi_{01} - \omega_2 t - \varphi_{02} = \text{const},$$

откуда следует

$$(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_{01} - \varphi_{02} = \text{const}.$$

Это справедливо лишь при

$$\omega_1 = \omega_2$$

Таким образом, условие постоянства во времени разности фаз эквивалентно условиям одинаковости для когерентных лучей циклических частот в вакууме.

2) соизмеримость амплитуд интерферирующих волн,

3) одинаковое состояние поляризации,

4) лучи, пройдя разные пути, встречаются в некоторой точке пространства.

8.4 Методы наблюдения интерференции

1. Опыт Юнга

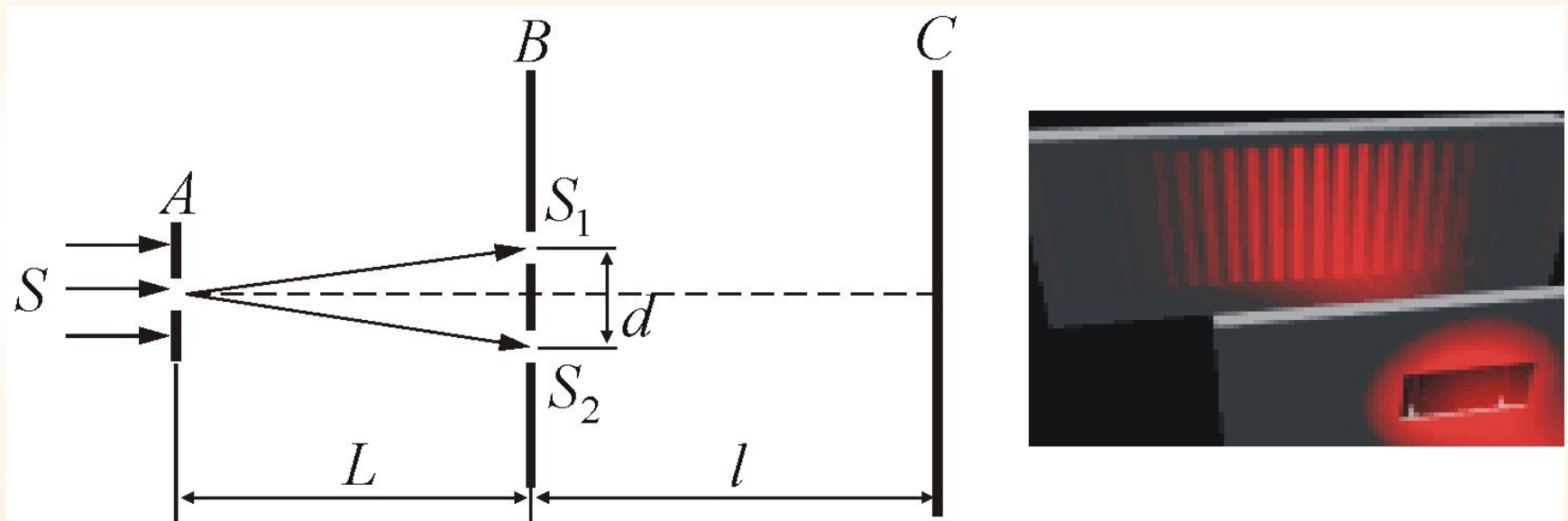
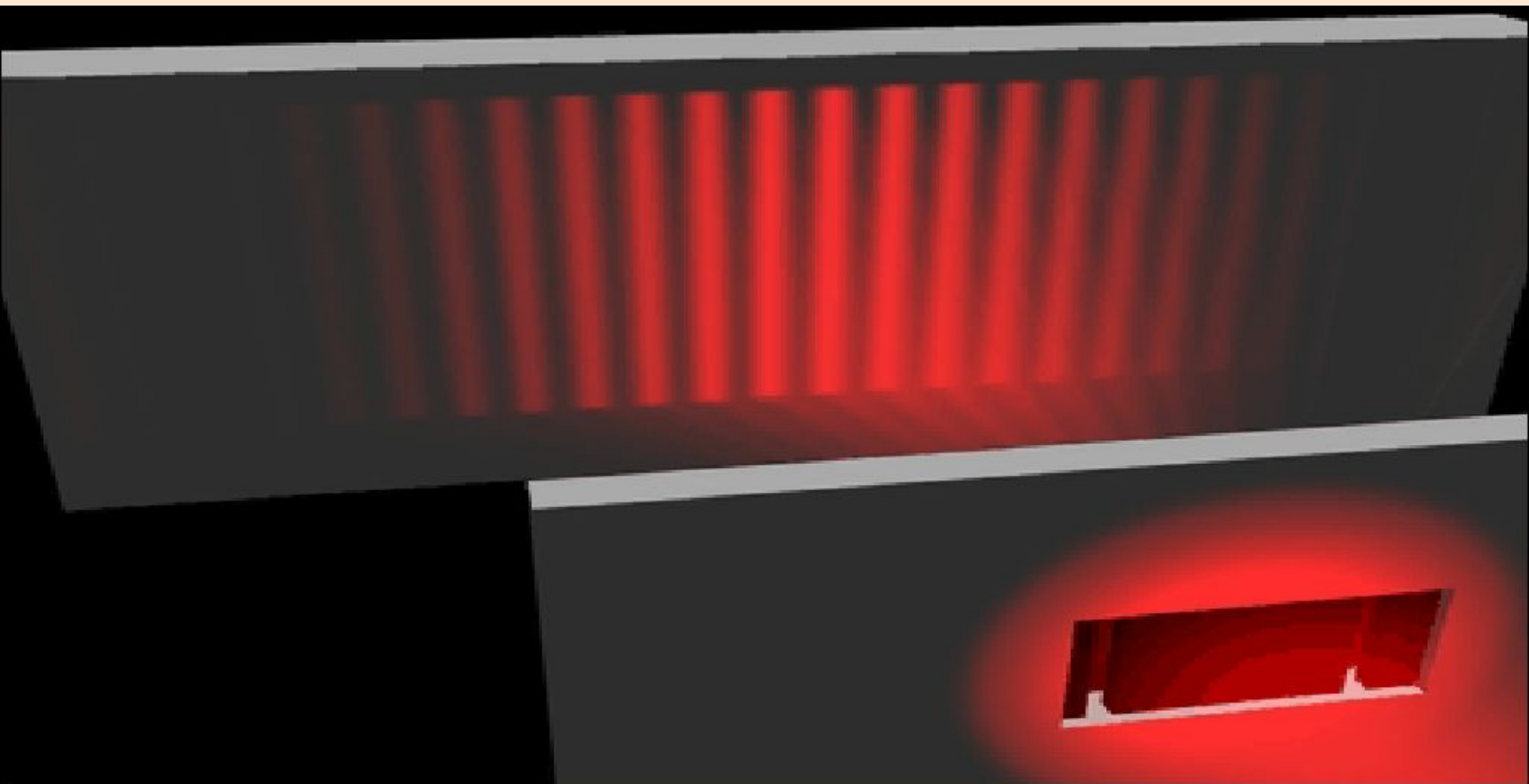


Рисунок 7.5

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{d}$$



Дифракция Фраунгофера на двух щелях. Ширина щелей b остается постоянной, а расстояние d между щелями изменяется

2. Зеркала Френеля

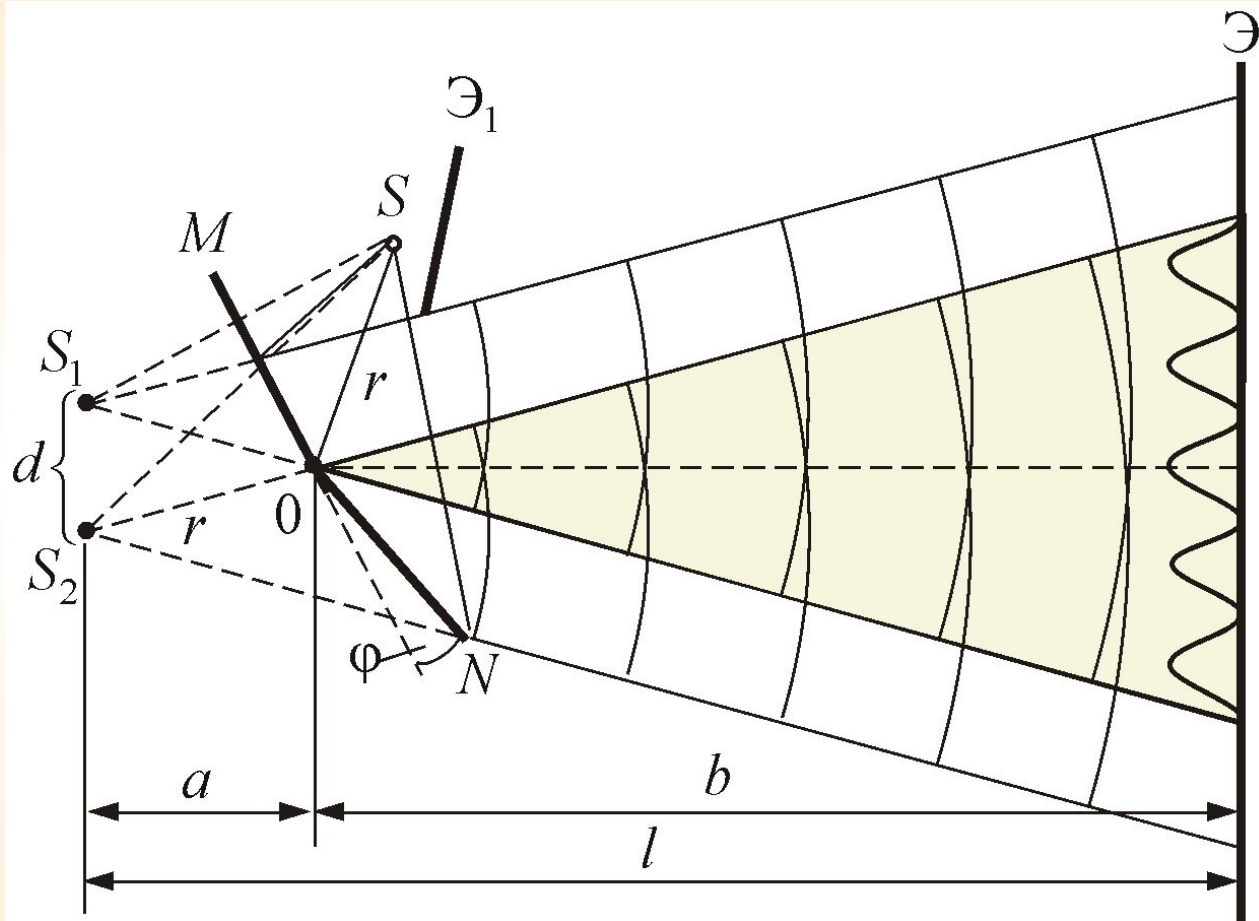


Рисунок 7.6

$$\Delta x \approx \frac{\lambda l}{d} = \frac{\lambda(a+b)}{2a^3 \varphi}$$

3. Бипризма Френеля

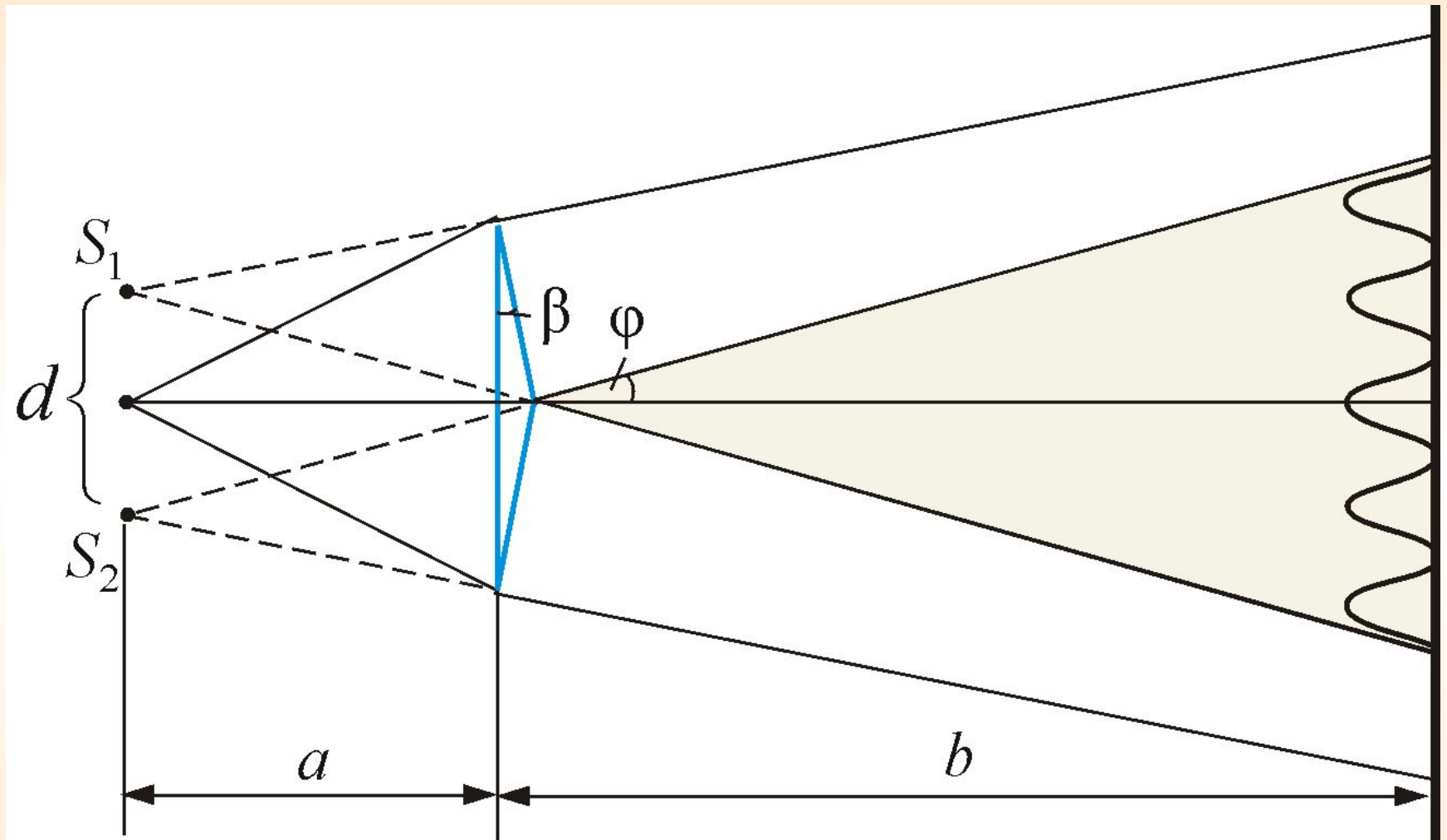


Рисунок 7.7

4. Билинза Бийе

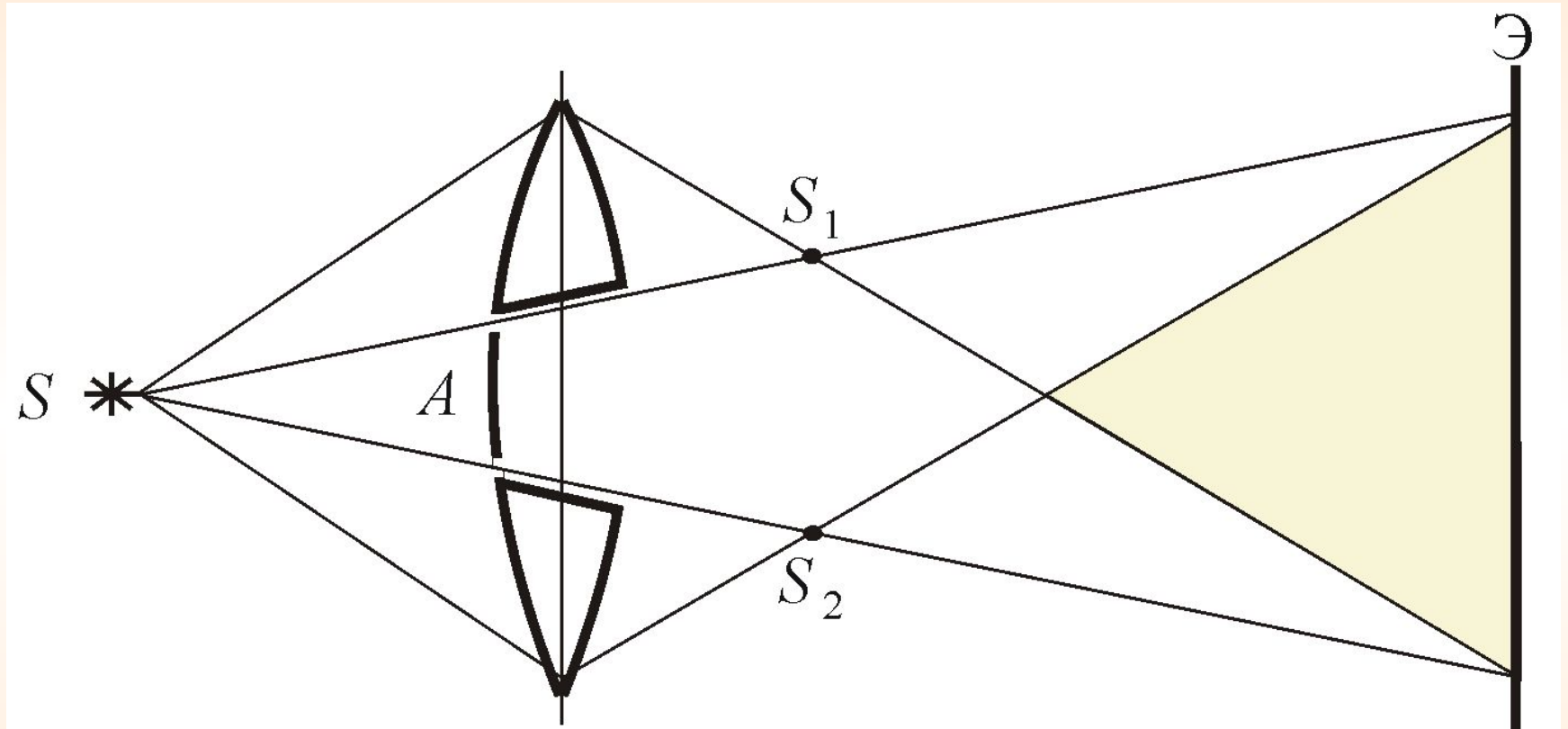
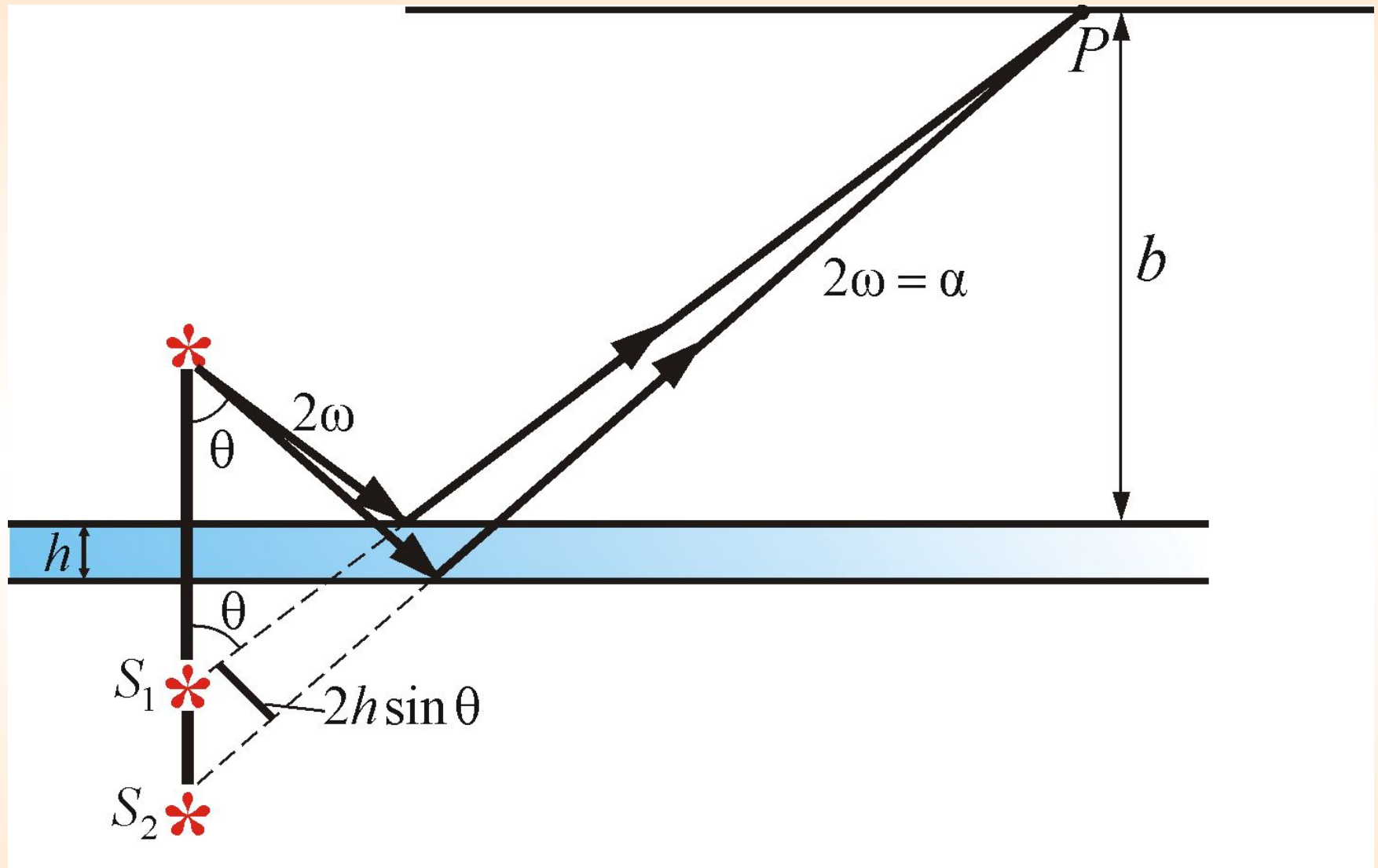


Рисунок 7.8

8.5 Интерференция в тонких пленках

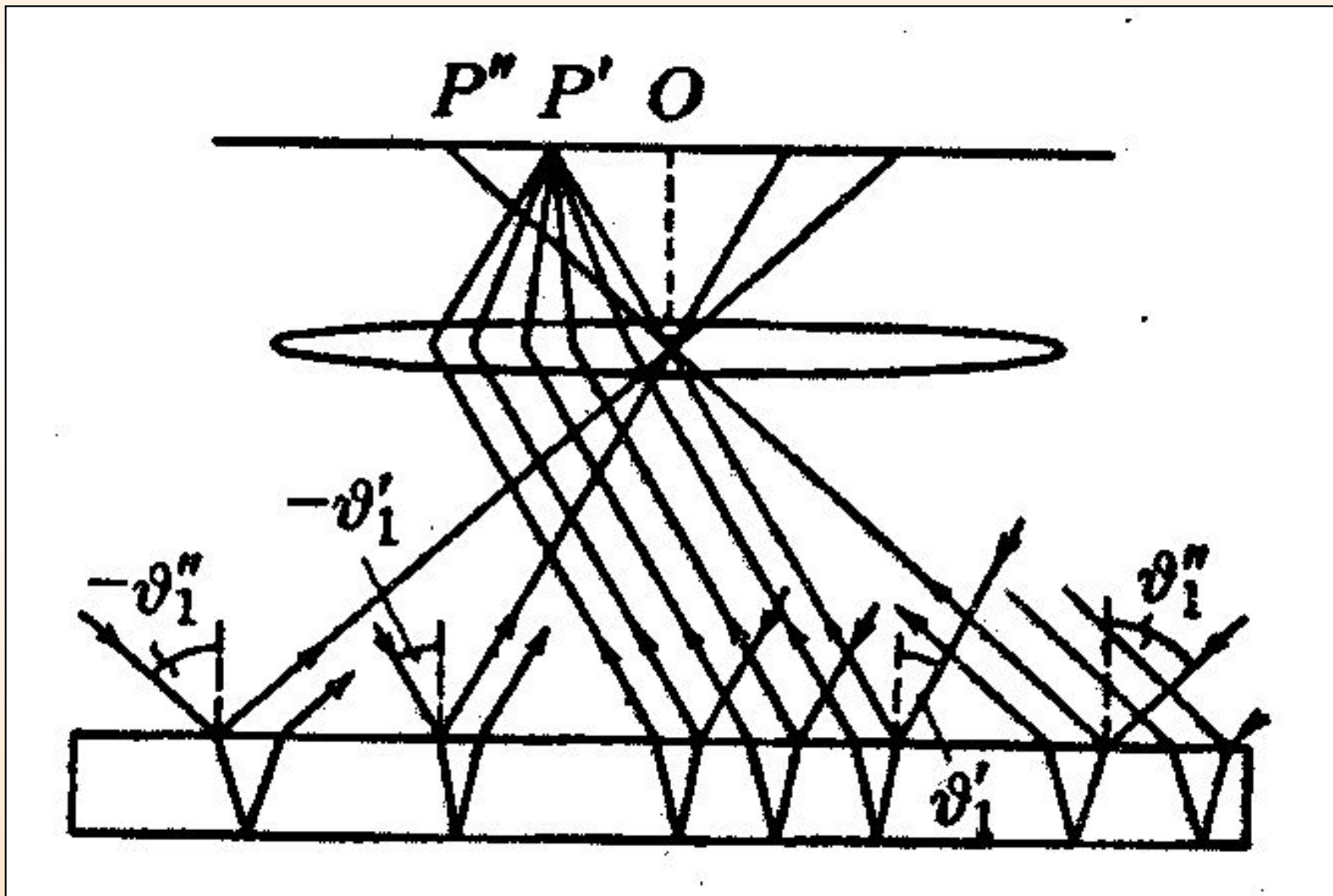
Интерференцию света по *методу деления амплитуды* во многих отношениях наблюдать проще, чем в опытах с *делением волнового фронта*. Один из способов, использующих такой метод – *опыт Поля*.

Опыт Поля



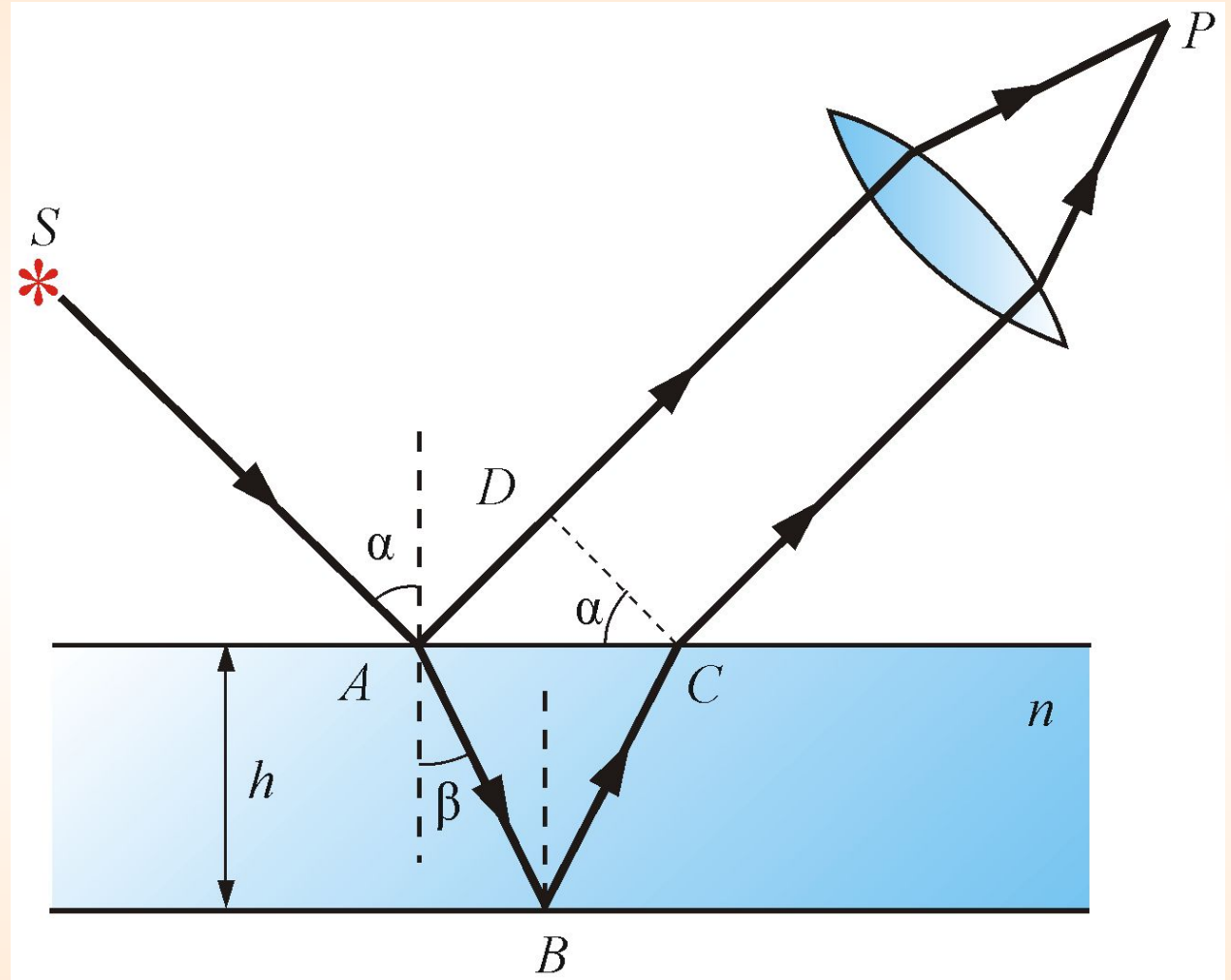
Интерференция в тонких пленках

Интерференционные *полосы равного наклона*



Интерференция в тонких пленках

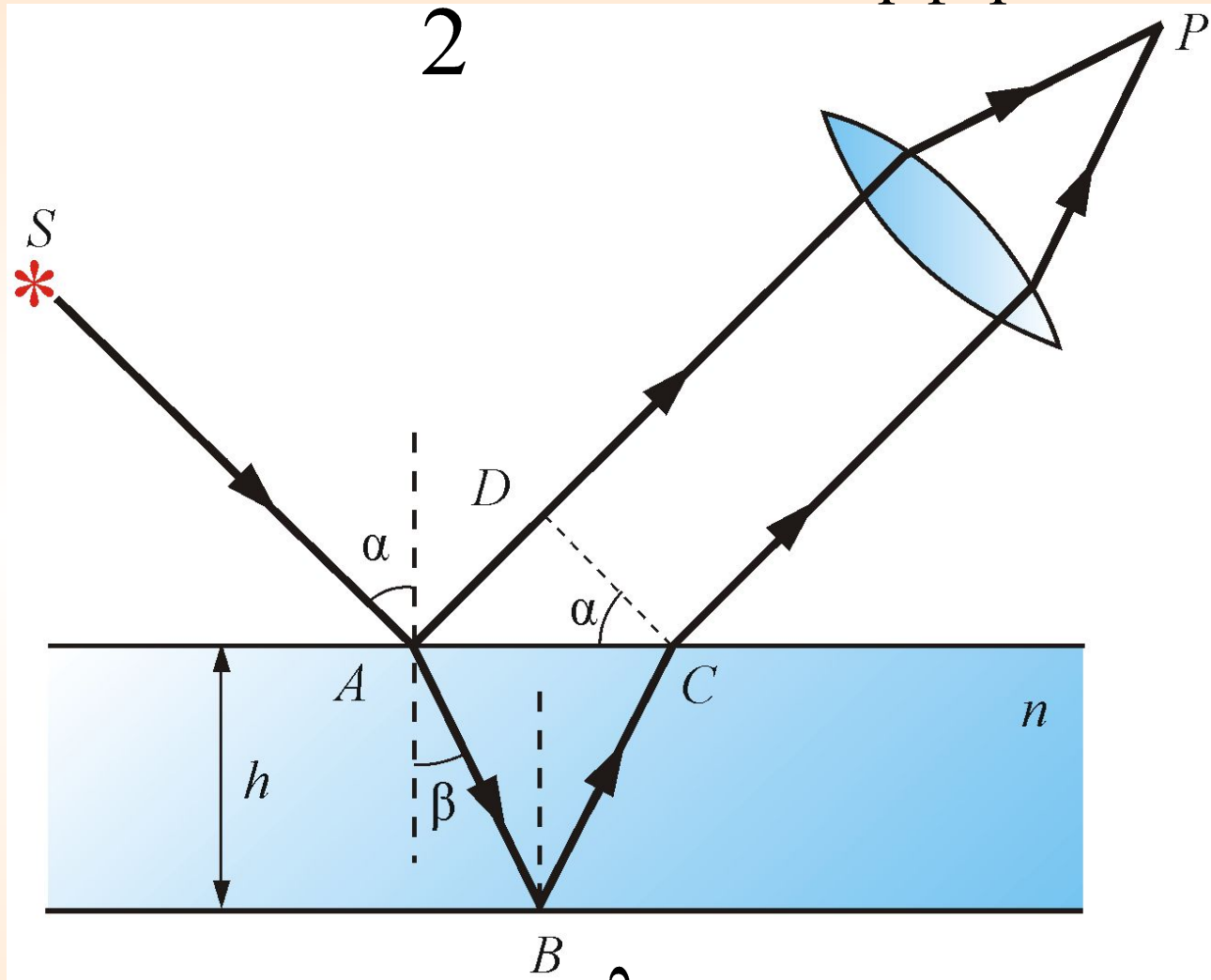
Интерференционные *полосы* *равного наклона*



**Оптическая
разность хода**
с учетом потери
полуволны:

$$\Delta = 2nh \cos \beta \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2h \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2} - \text{max интерференции}$$



$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} - \text{min интерференции}$$

Для наблюдения *интерференционных полос* *равного наклона* вместо плоскопараллельной пластинки можно использовать *интерферометр Майкельсона* :

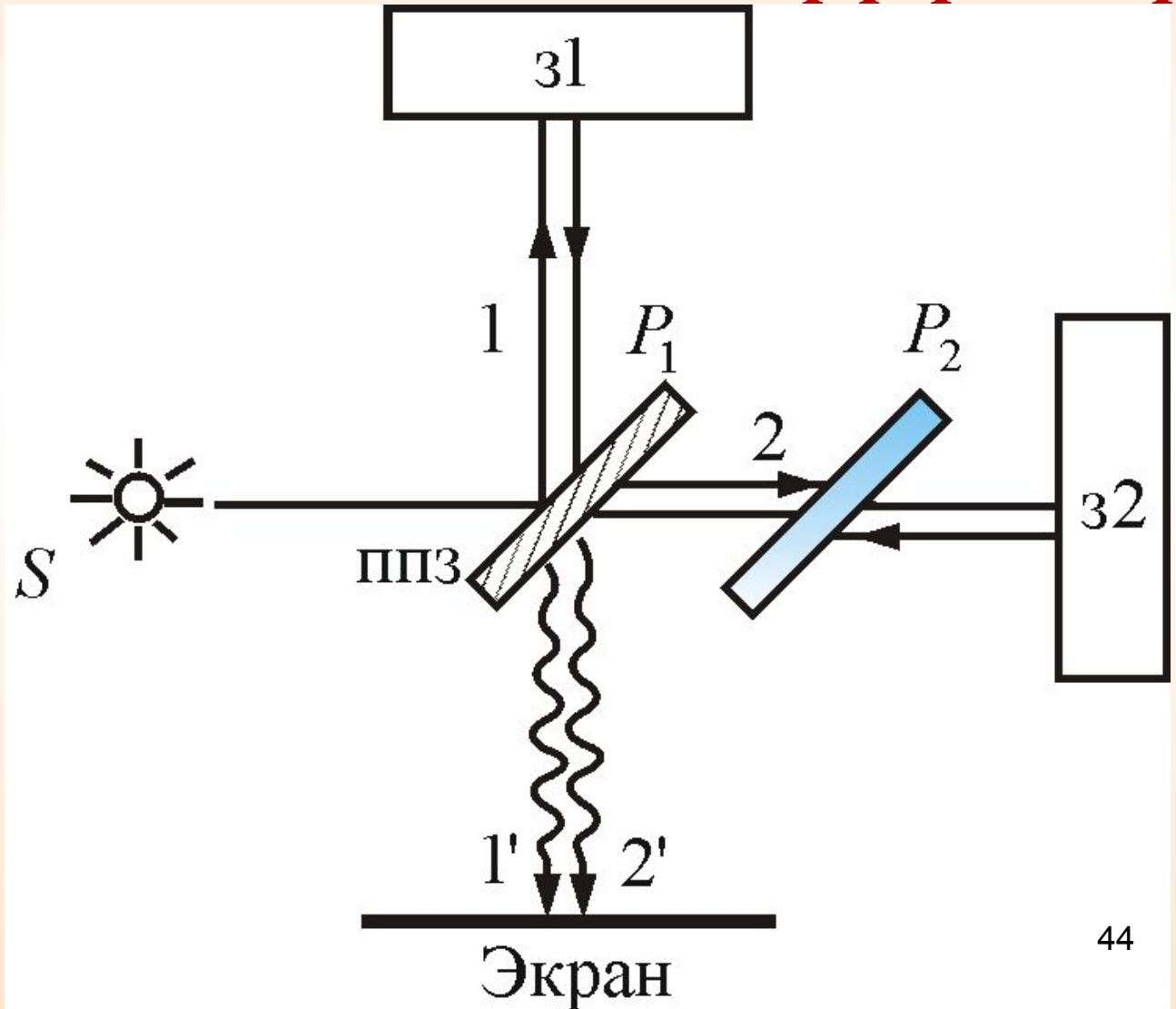
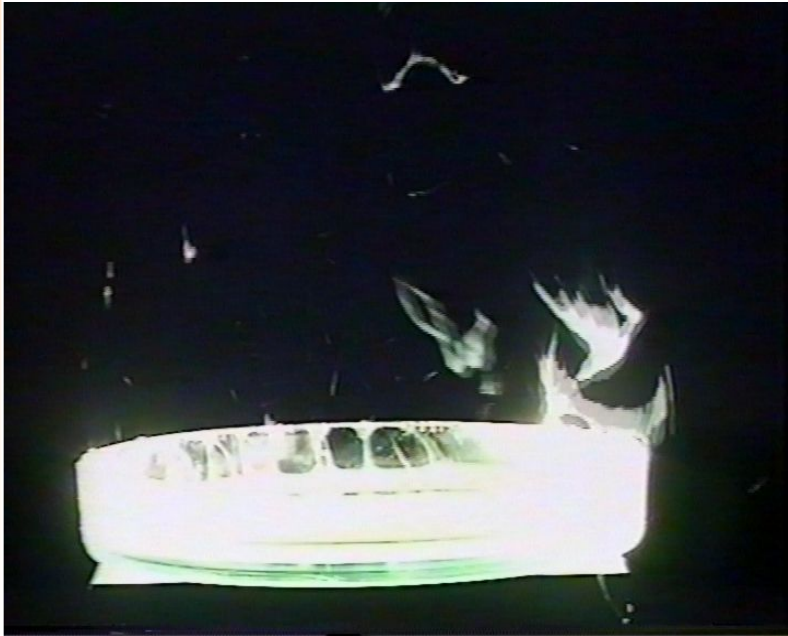


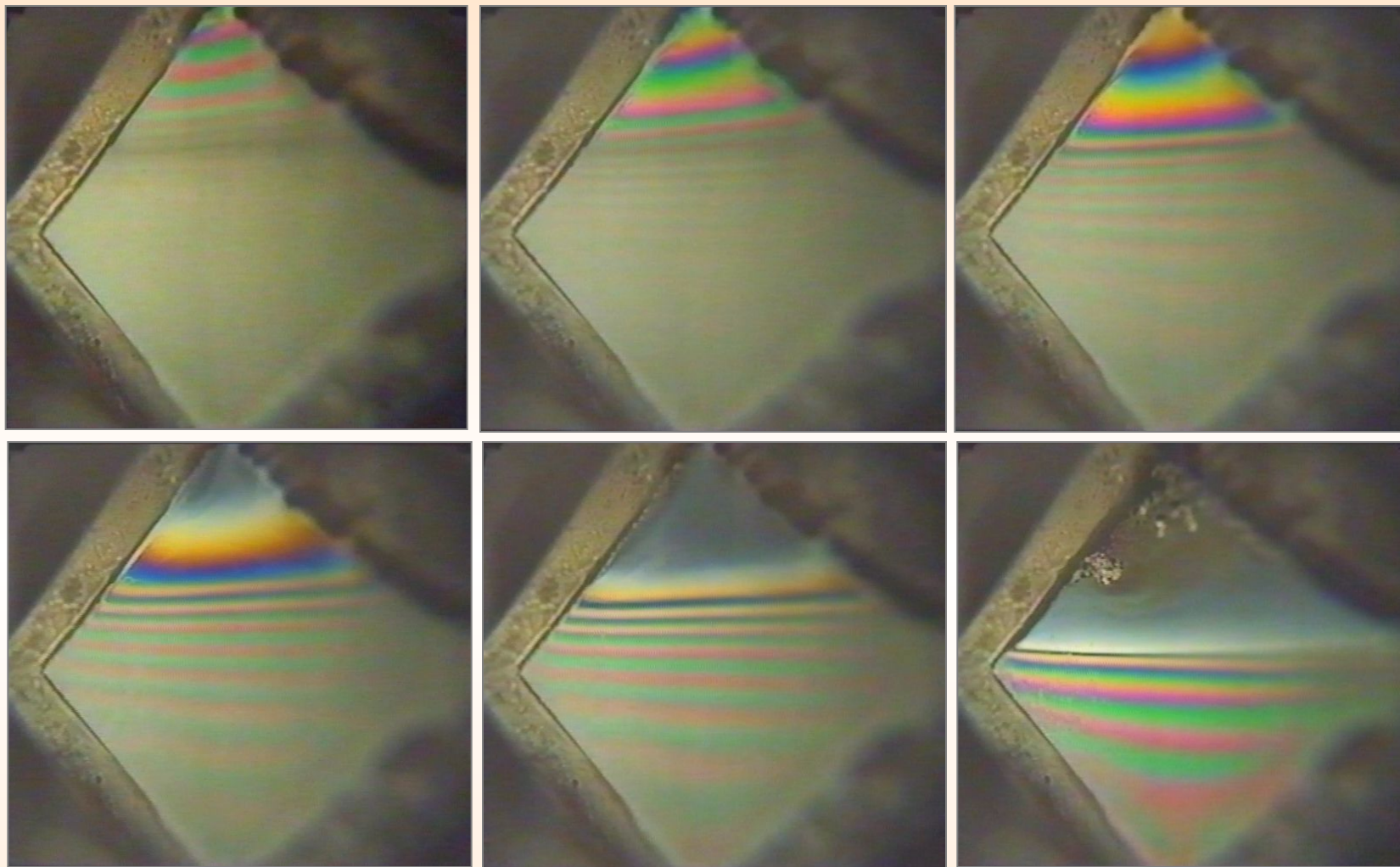
Рисунок 7.11

Интерференция от клина.

Полосы равной толщины

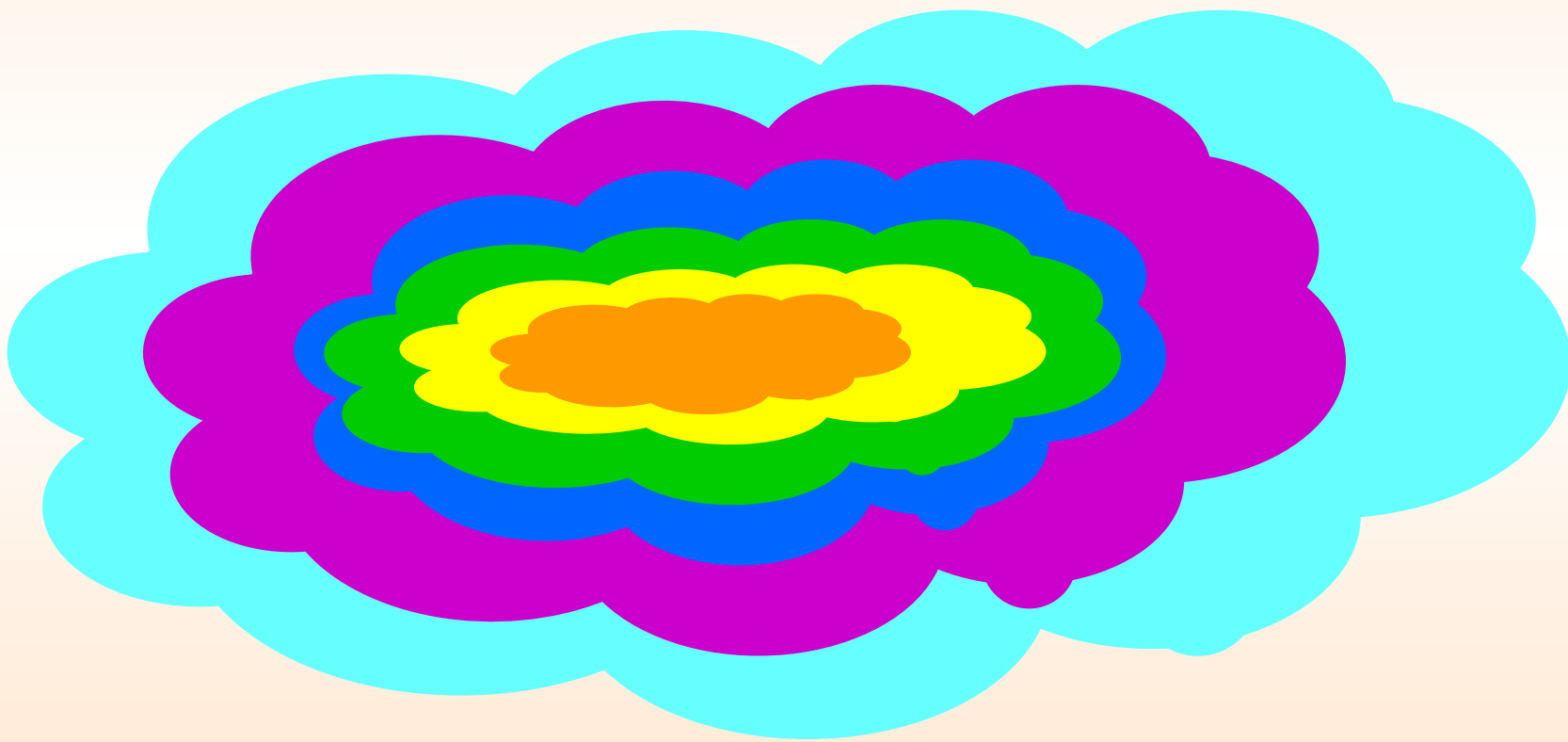
В белом свете интерференционные полосы, при отражении от тонких пленок - окрашены. Поэтому такое явление называют ***цвета тонких пленок.*** Его легко наблюдать на мыльных пузырях, на тонких пленках масла или бензина, плавающих на поверхности воды, на пленках окислов, возникающих на поверхности металлов при закалке, и т.п.



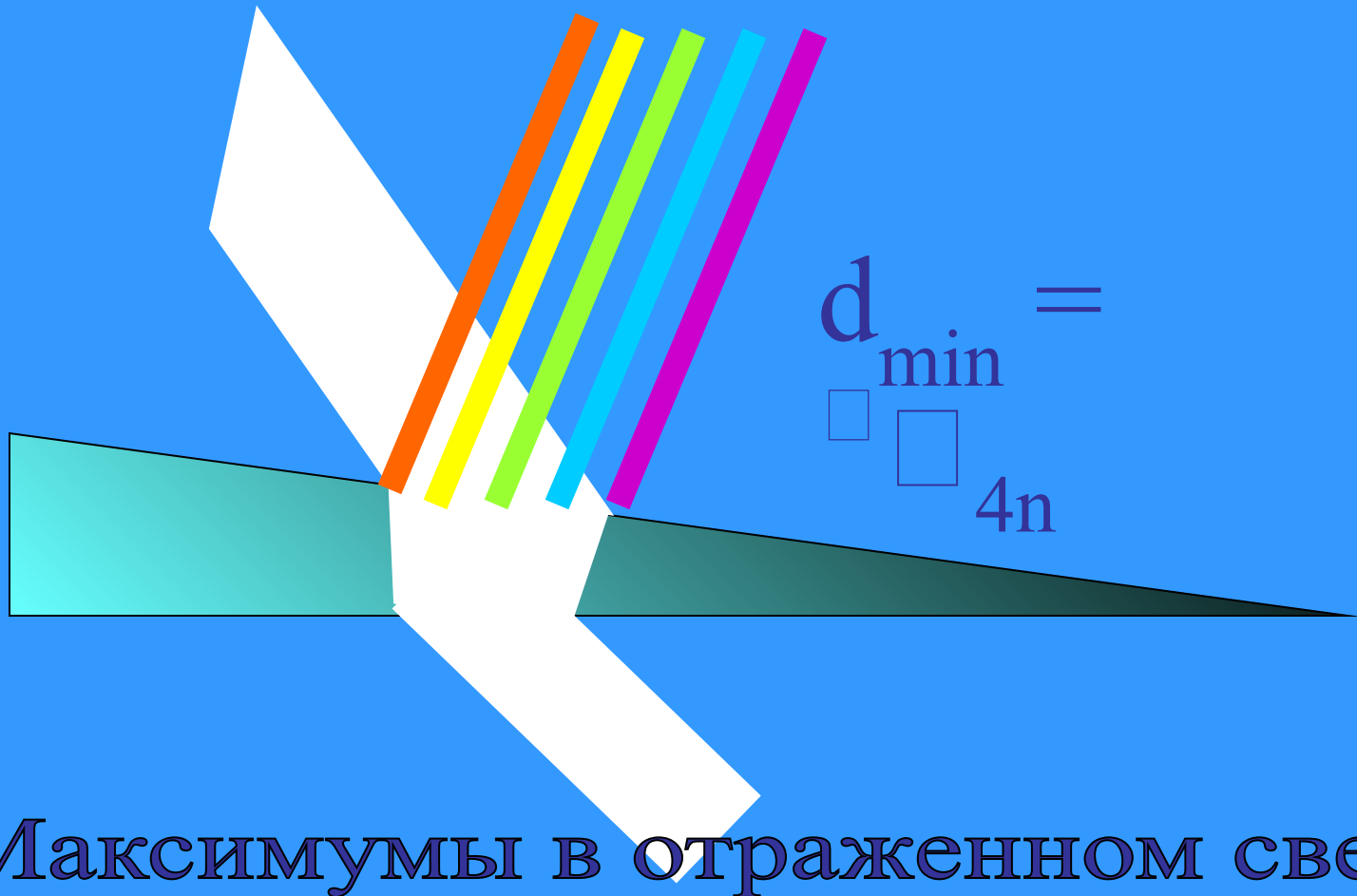


Изменение картины интерференции по мере уменьшения толщины мыльной пленки

НЕФТЬ НА ВОДЕ

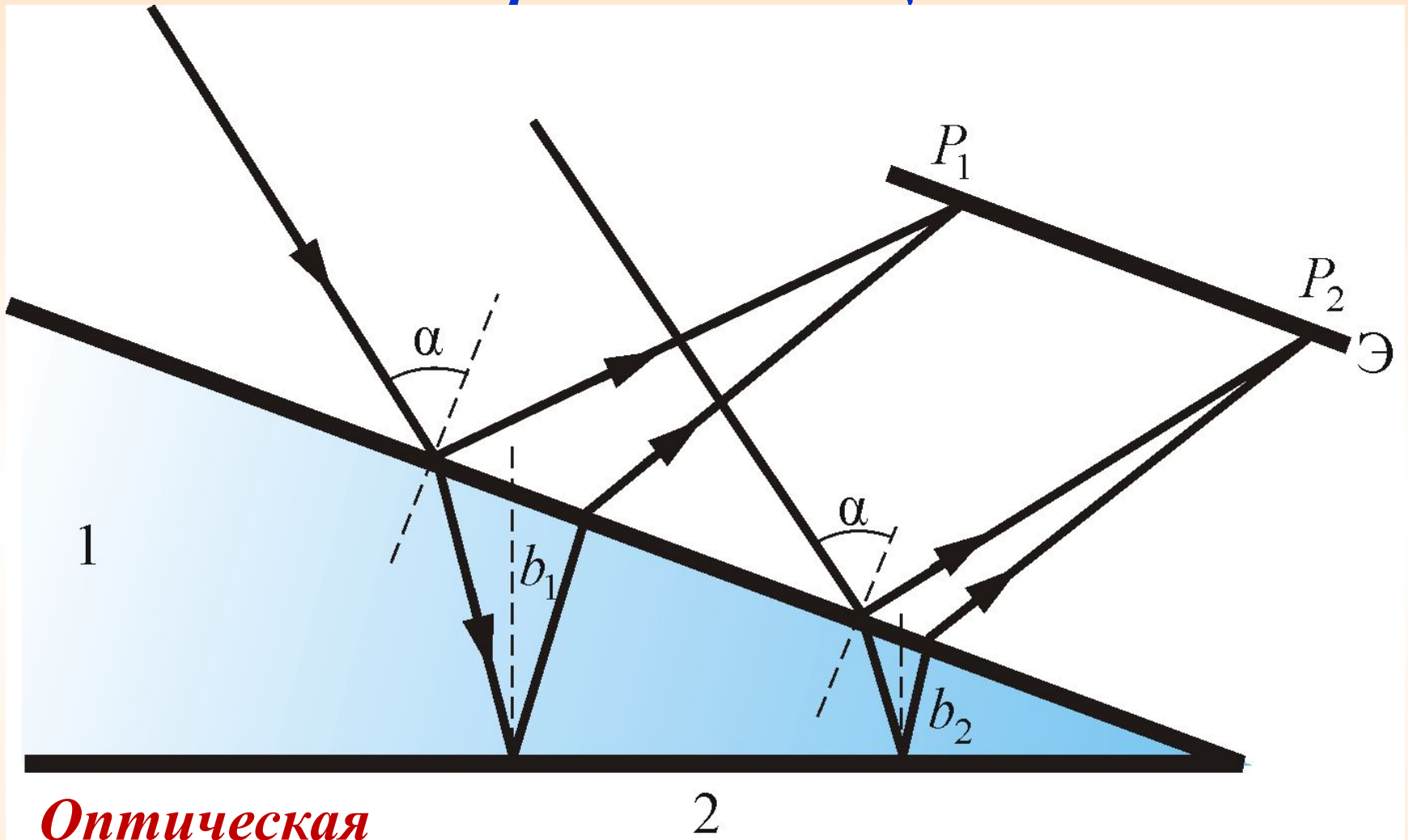


Интерференция на клине



Максимумы в отраженном свете

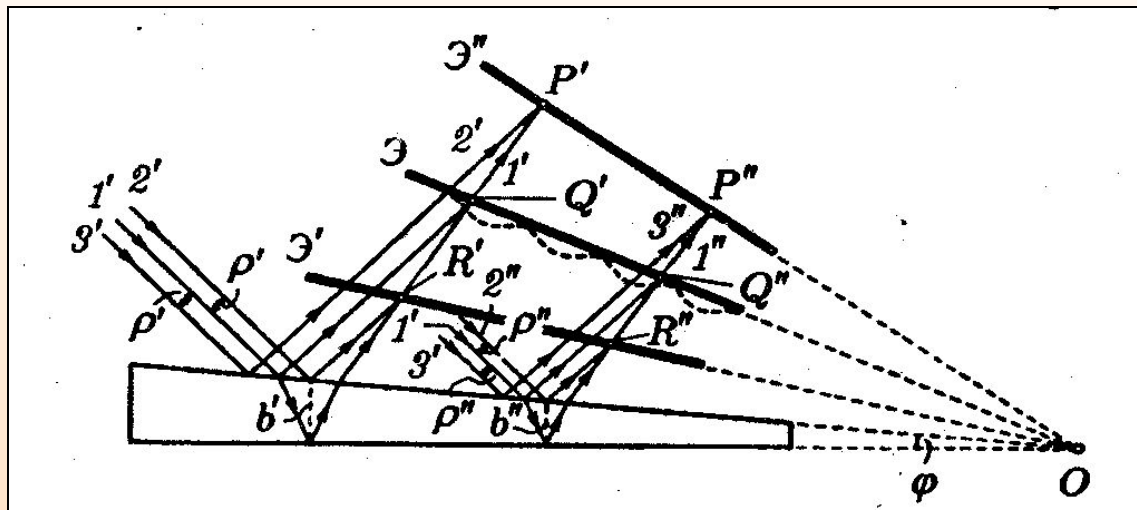
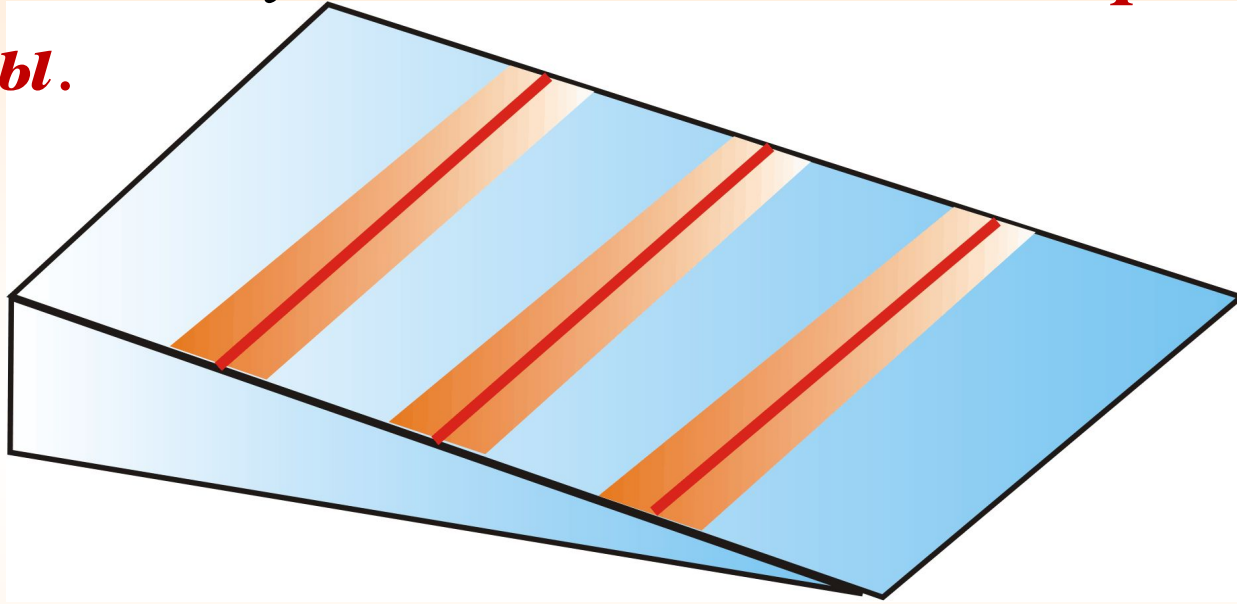
Полосы равной толщины



**Оптическая
разность хода**
с учетом потери
полуволны:

$$\Delta = 2b \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$

Каждая из интерференционных полос возникает в результате отражения от участков клина с одинаковой толщиной, поэтому их называют ***полосами равной толщины***.



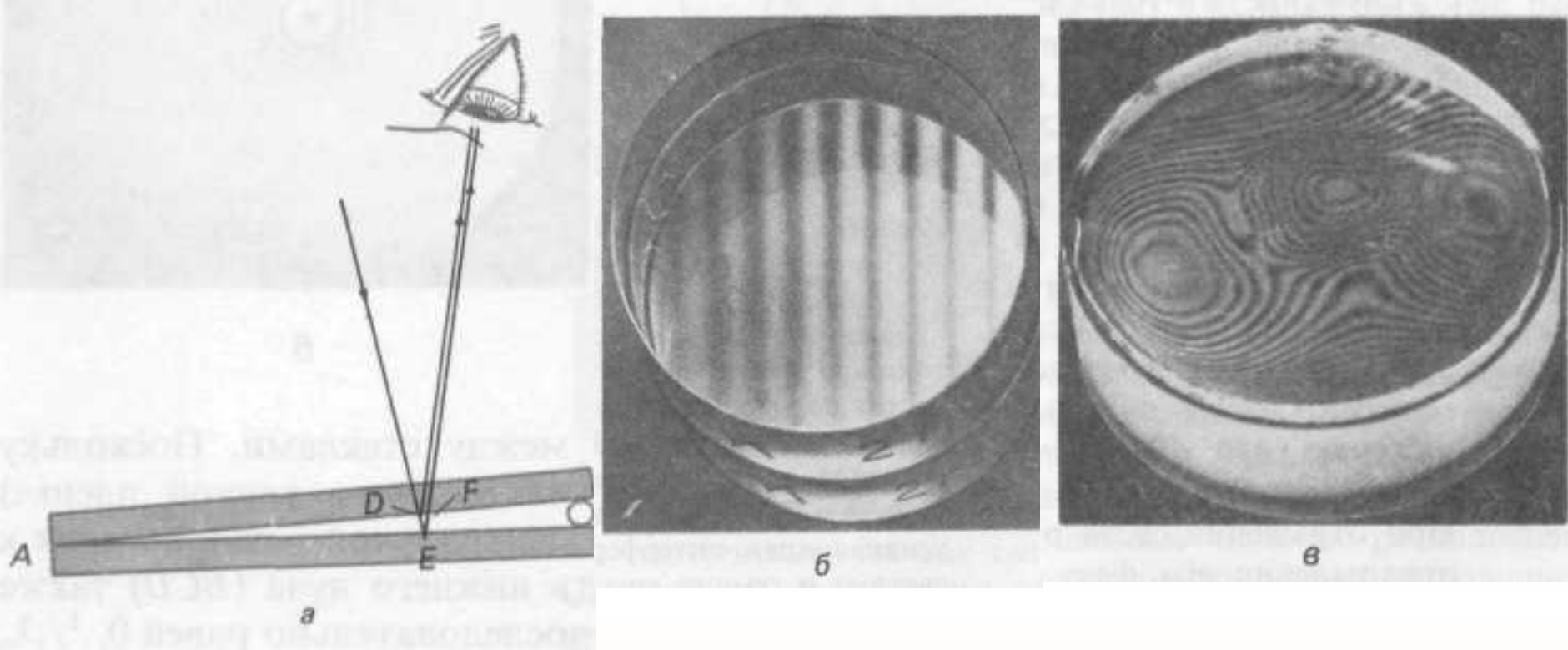


Рис. *а* - световые лучи, отражаясь от верхней и нижней поверхностей тонкого воздушного клина, интерферируют и образуют светлые и темные полосы:

б - интерференционная картина, наблюдаемая в случае оптически плоских стеклянных пластин;

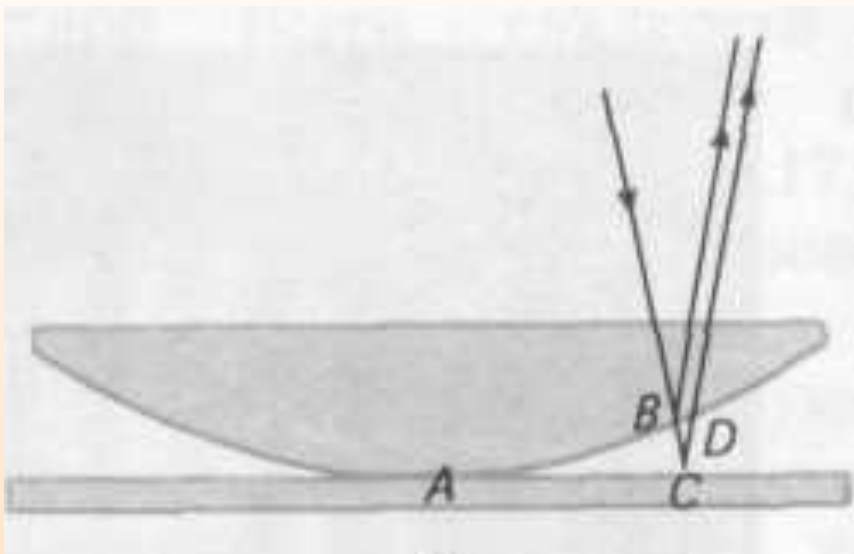
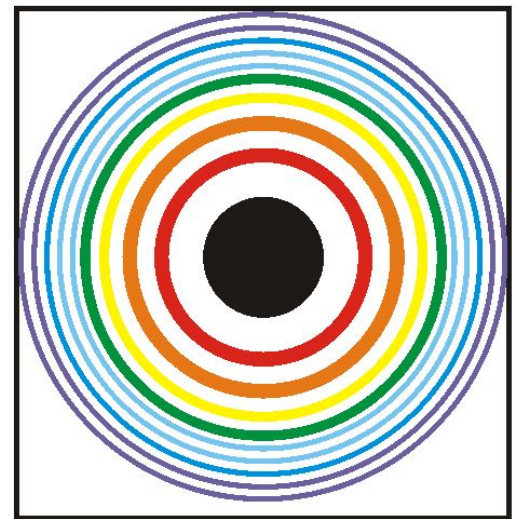
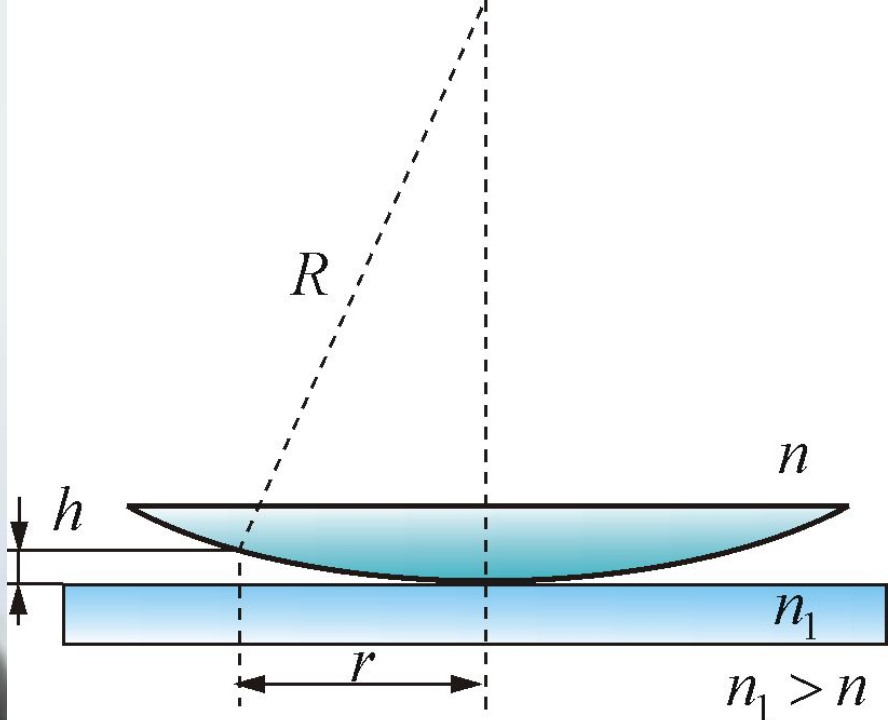
в - интерференционная картина, наблюдаемая в случае неплоских пластин.



Кольца Ньютона

*Кольцевые **полосы** **равной** **толщины**, наблюдаемые в воздушном зазоре*

*между **соприкасающимися** **выпуклой** **сферической** **поверхностью** **линзы** **малой** **кривизны** и **плоской** **поверхностью** **стекла**, называют **кольцами Ньютона**.*



Кольца Ньютона

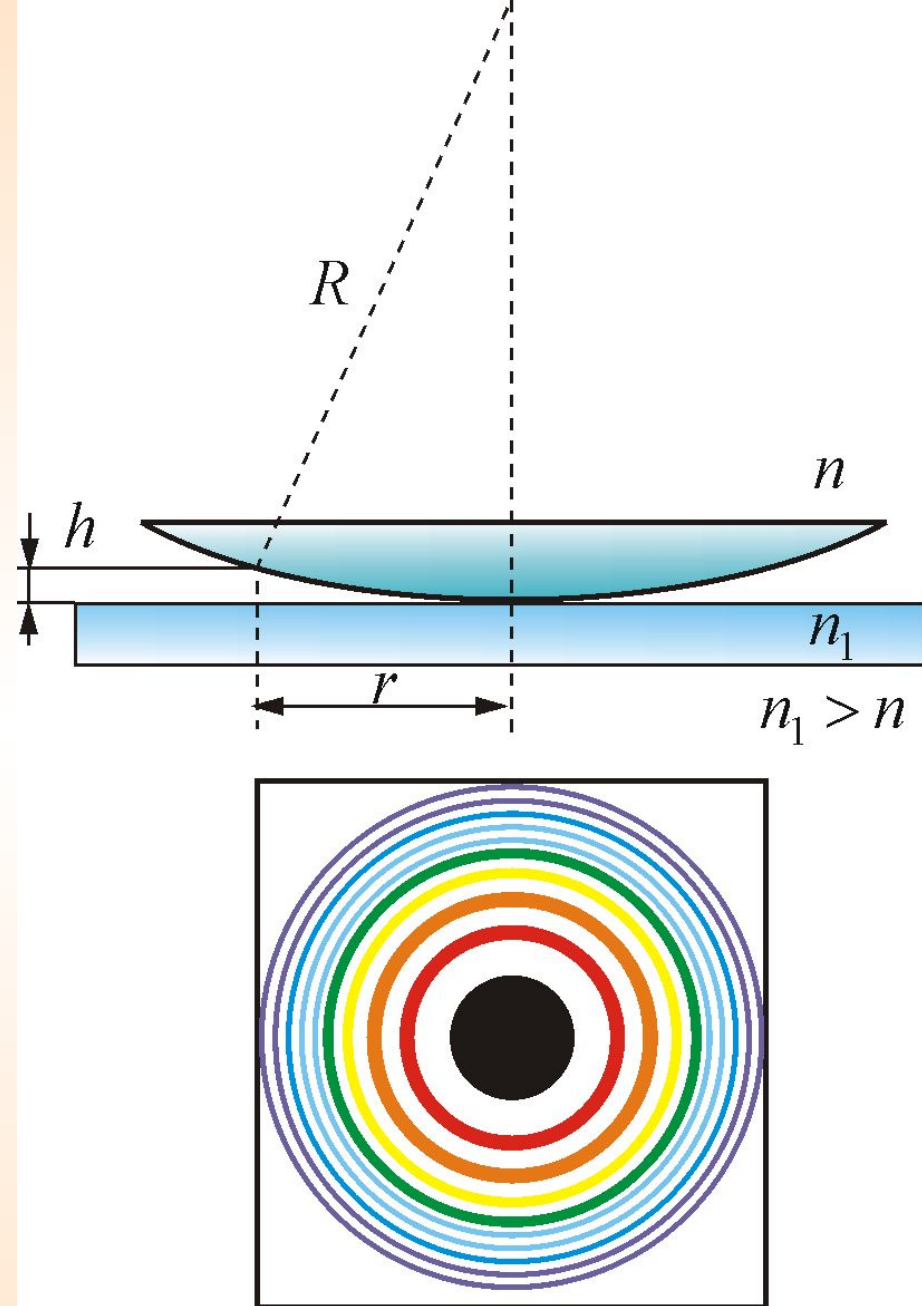
$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \approx \frac{r^2}{2R}$$

$$h = \frac{m\lambda}{2}$$

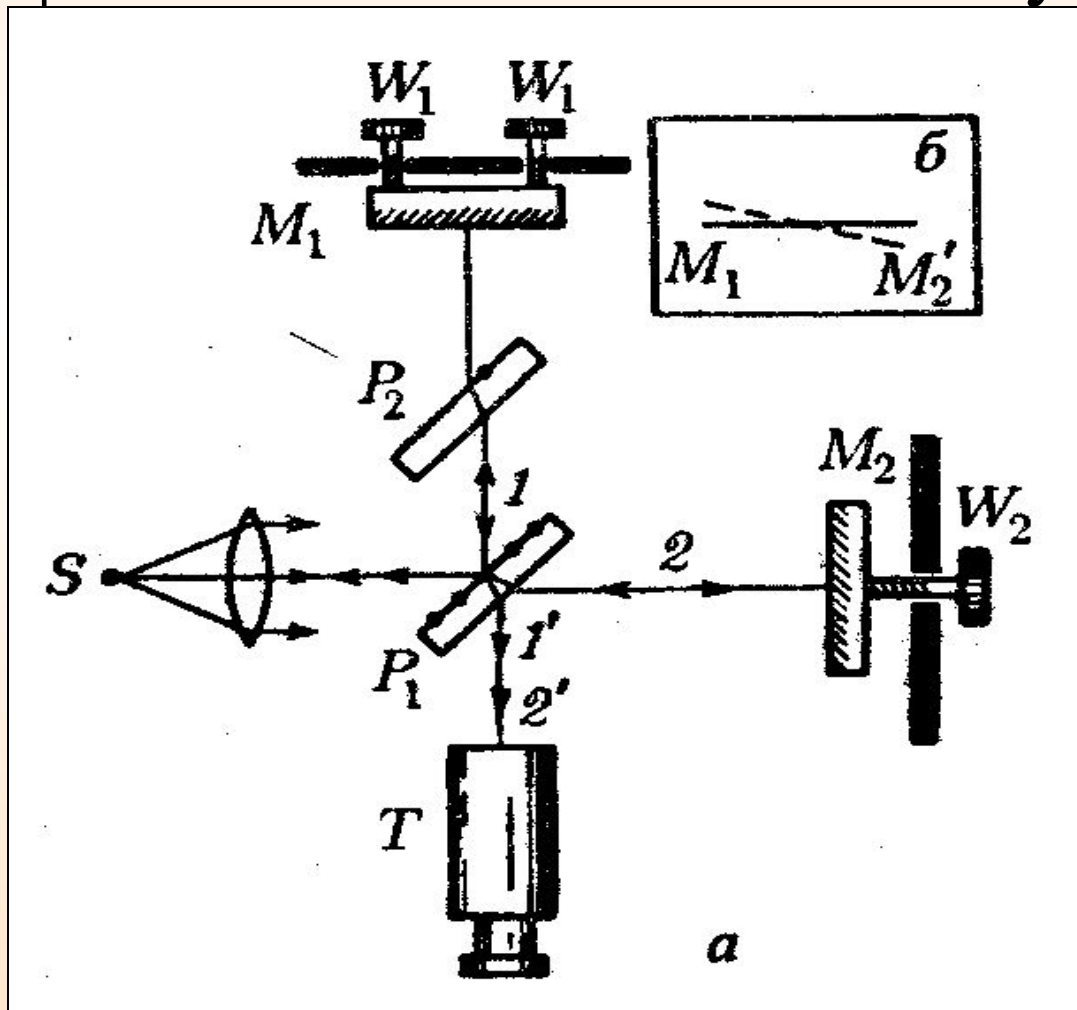
$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda_0 R}$$

*- Радиус m -го
светлого кольца*

$$r_m = \sqrt{mR\lambda_0} \quad \text{- Радиус } m\text{-го темного кольца}$$



Полосы равной толщины можно наблюдать и с помощью разных интерферометров, например **интерферометра Майкельсона**, если одно из зеркал M_1 отклонить на небольшой угол:



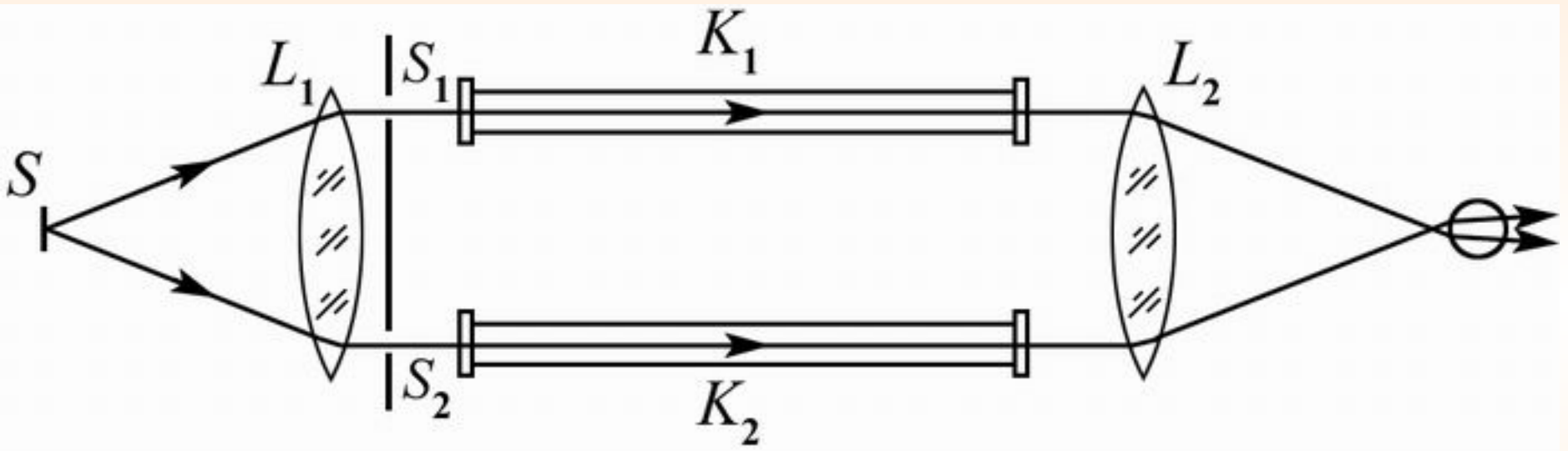


Схема интерферометра Рэлея

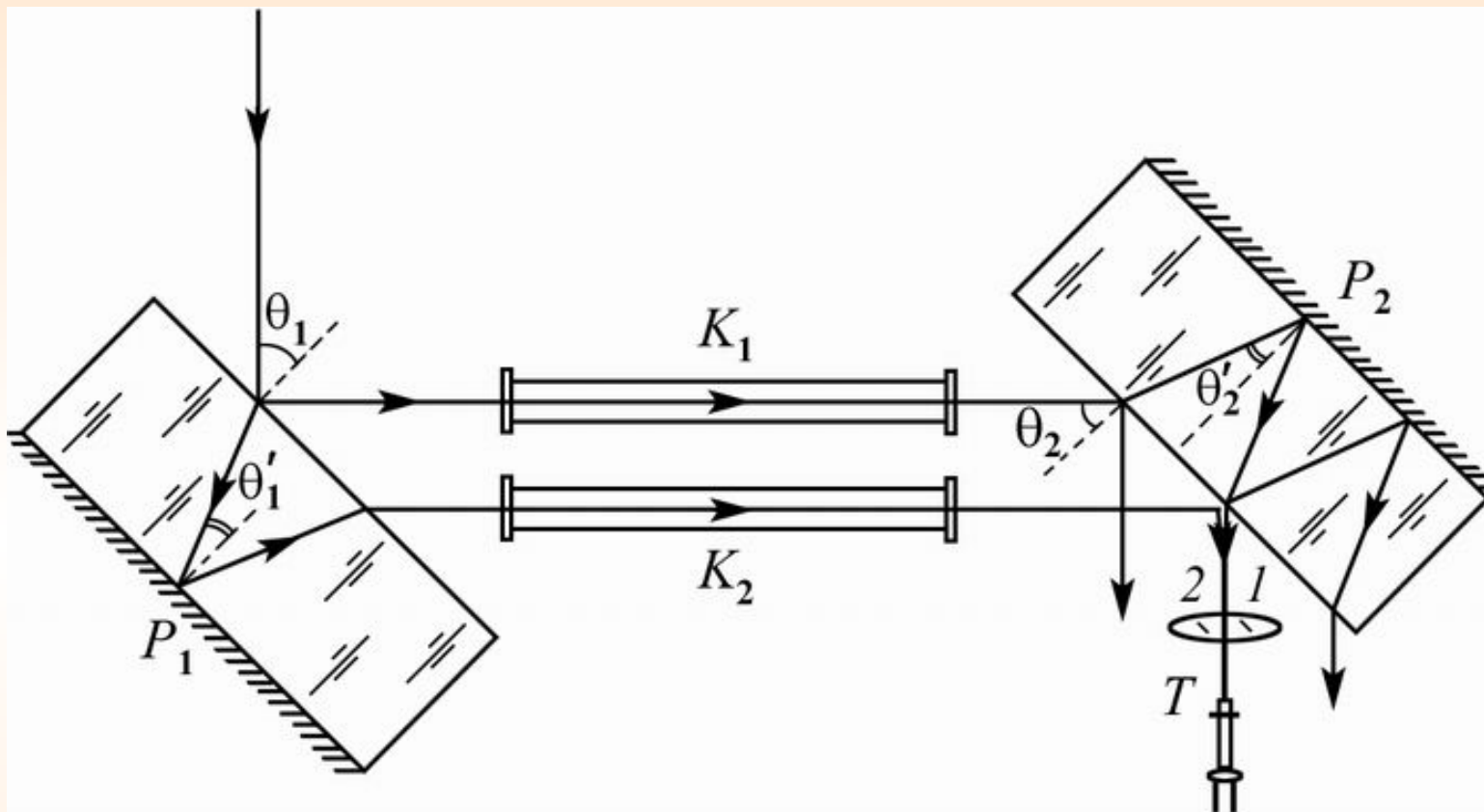


Схема интерферометра Жамена

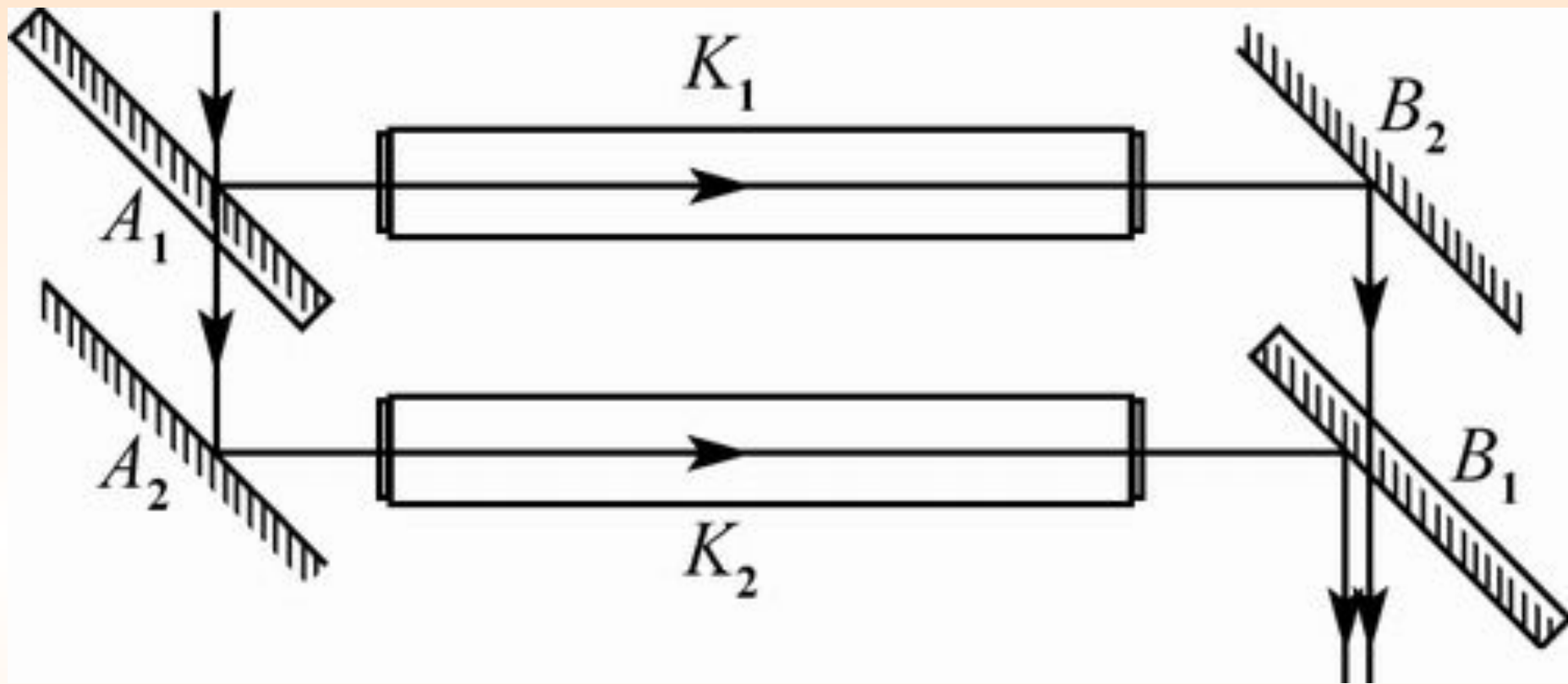
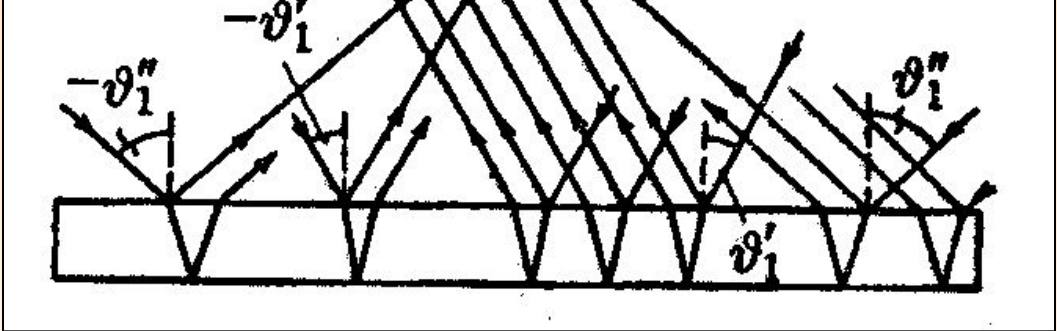


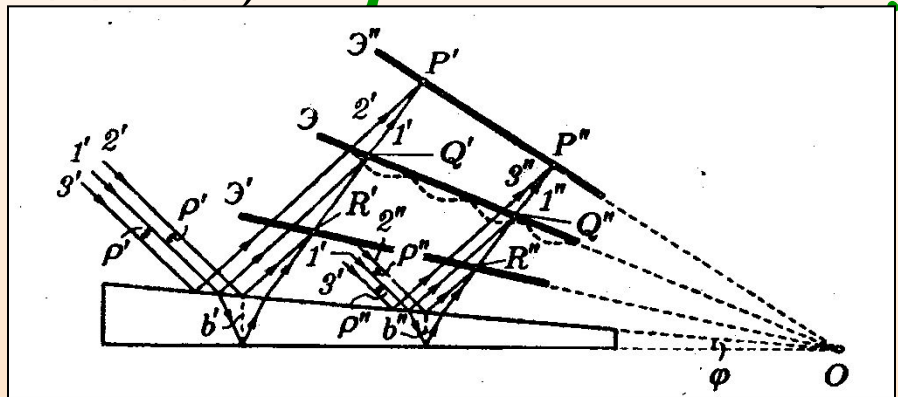
Схема интерферометра Рождественского



Итак:

- **полосы равного наклона** получаются при освещении **пластинки постоянной толщины** ($b = \text{const}$) **рассеянным светом** в котором содержатся лучи разных направлений.

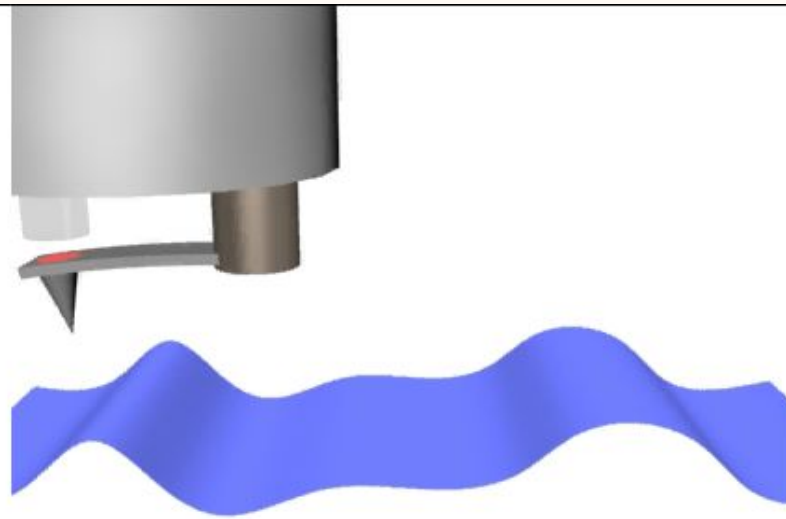
- **полосы равной толщины** наблюдаются при освещении **пластинки переменной толщины** (клина) ($b \neq \text{const}$) **параллельным пучком света**.



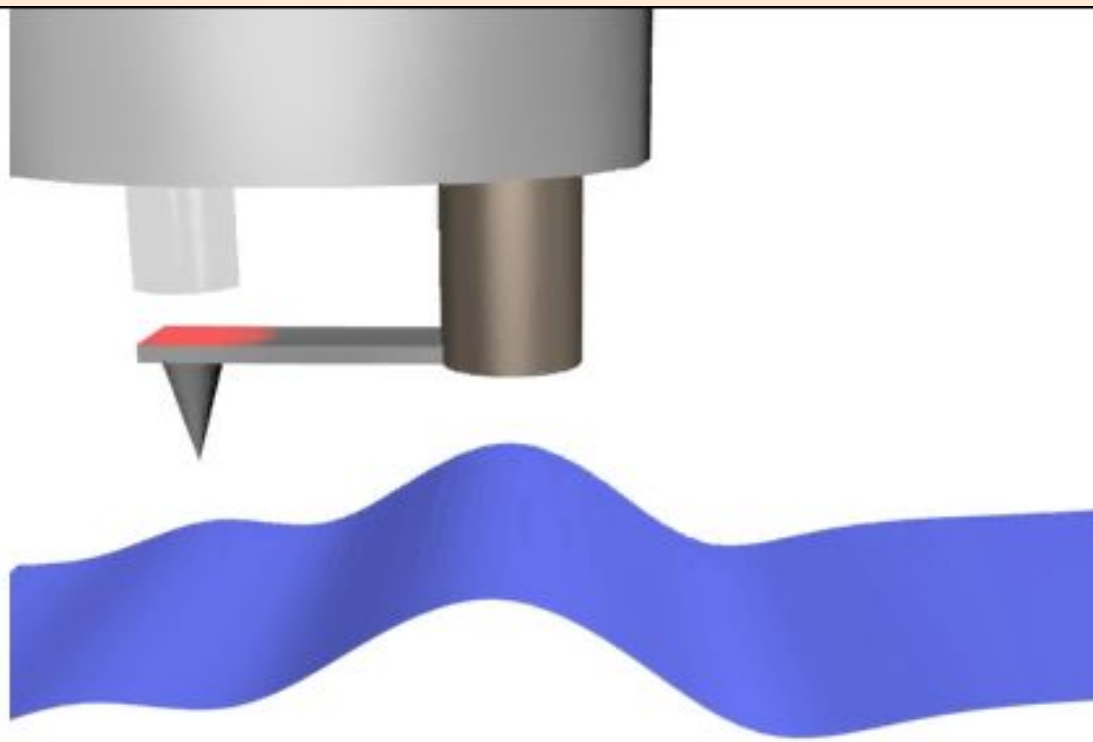
8.6 Применение интерференции света

1. Тот факт, что расположение интерференционных полос зависит от длины волны и разности хода лучей, позволяет по виду интерференционной картины (или их смещению) *проводить точные измерения расстояний при известной длине волны* или, наоборот, *определять спектр интерферирующих волн (интерференционная спектроскопия).*

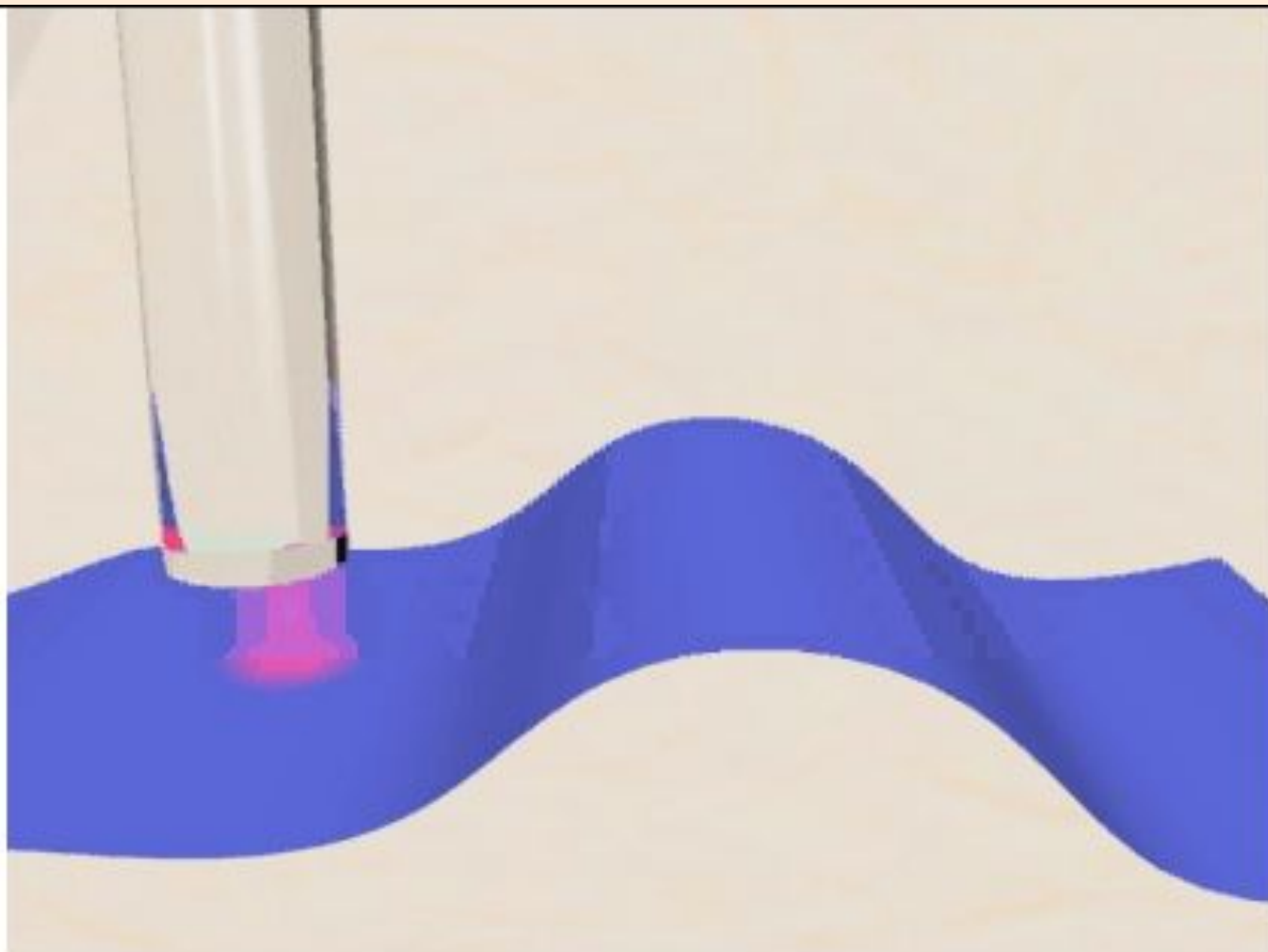
2. По интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды (в т.ч. фазовые), в которой распространяются волны, или отклонения формы поверхности от заданной.



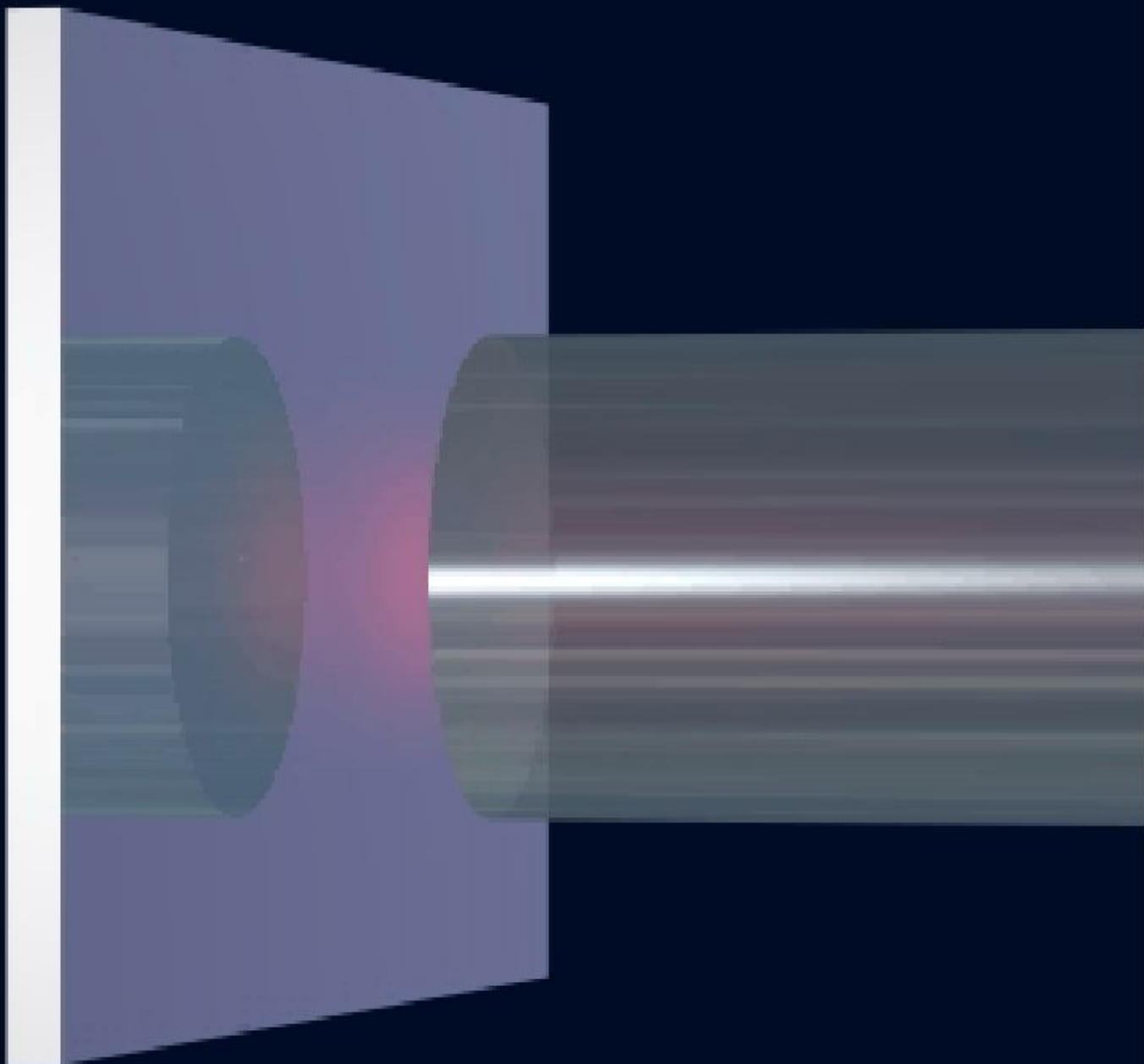
Волоконно-оптический атомный силовой микроскоп ВОАСМ в котором регистрация смещения чувствительной иглы производится по смещению рабочей точки волоконно-оптического интерферометра



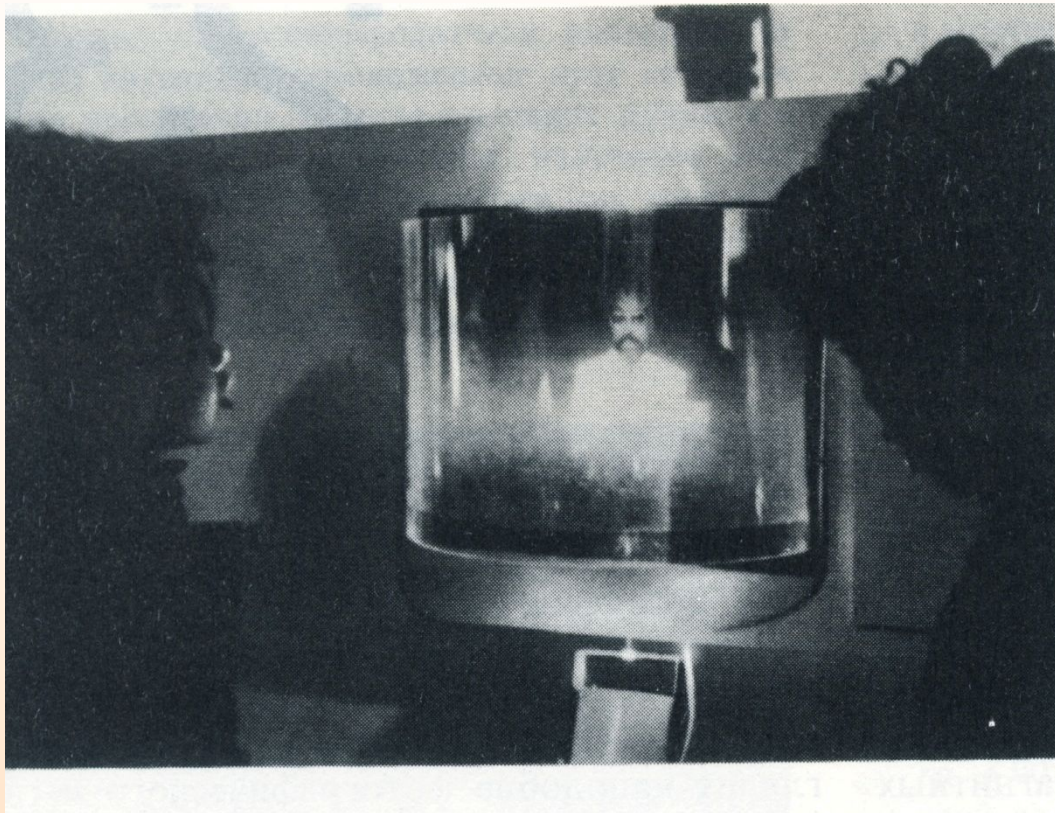
BOA-M резонансного типа, в котором воздействие на иглу со стороны атомов определяется по смещению частоты её собственных колебаний

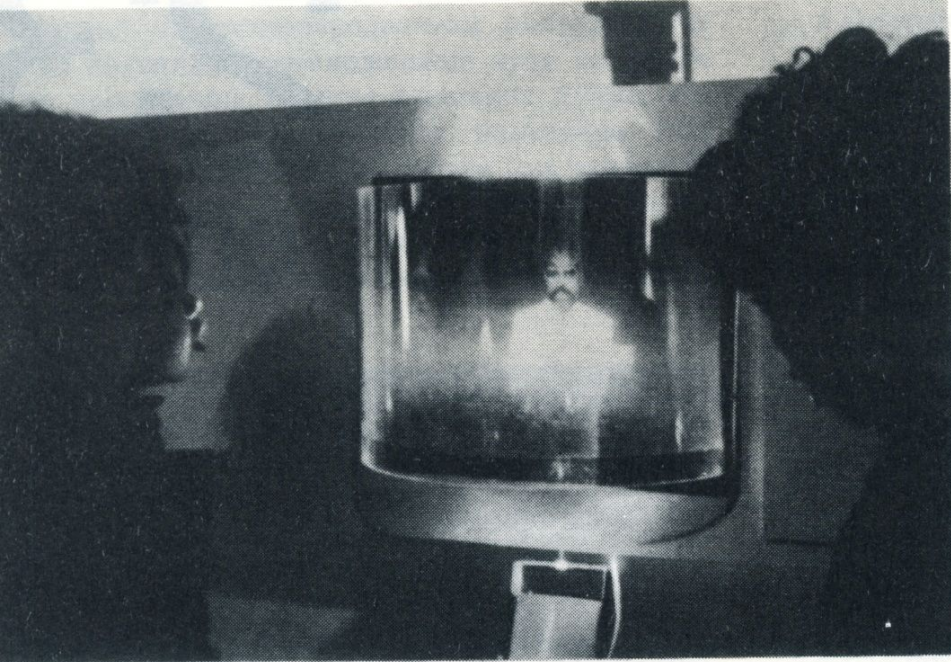


Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо - ещё один метод для исследования отражающих поверхностей

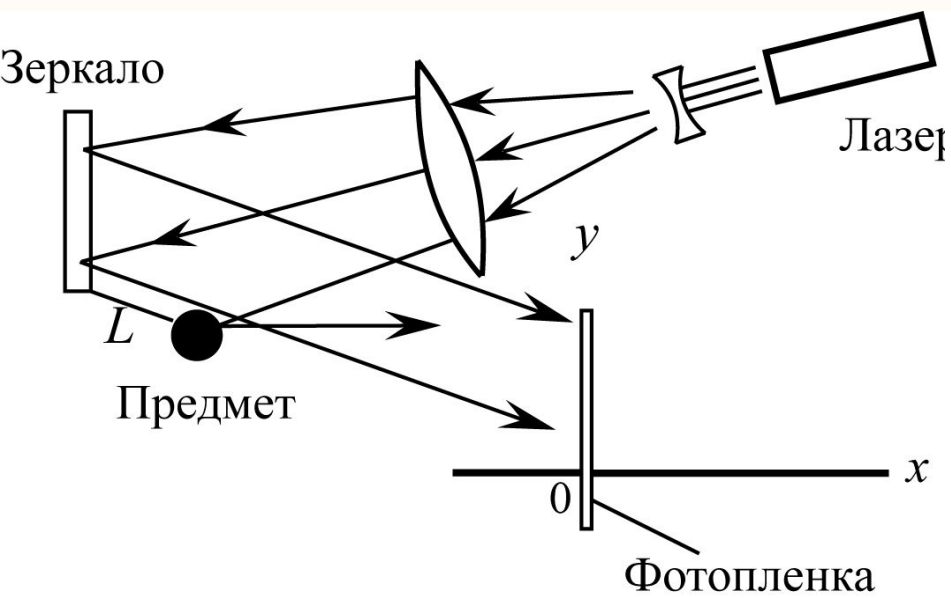


3. *Явление интерференции волн*, рассеянных от некоторого объекта (или прошедших через него), с *«опорной» волной* лежит в основе *голографии* (в т.ч. оптической, акустической или СВЧ-голографии).





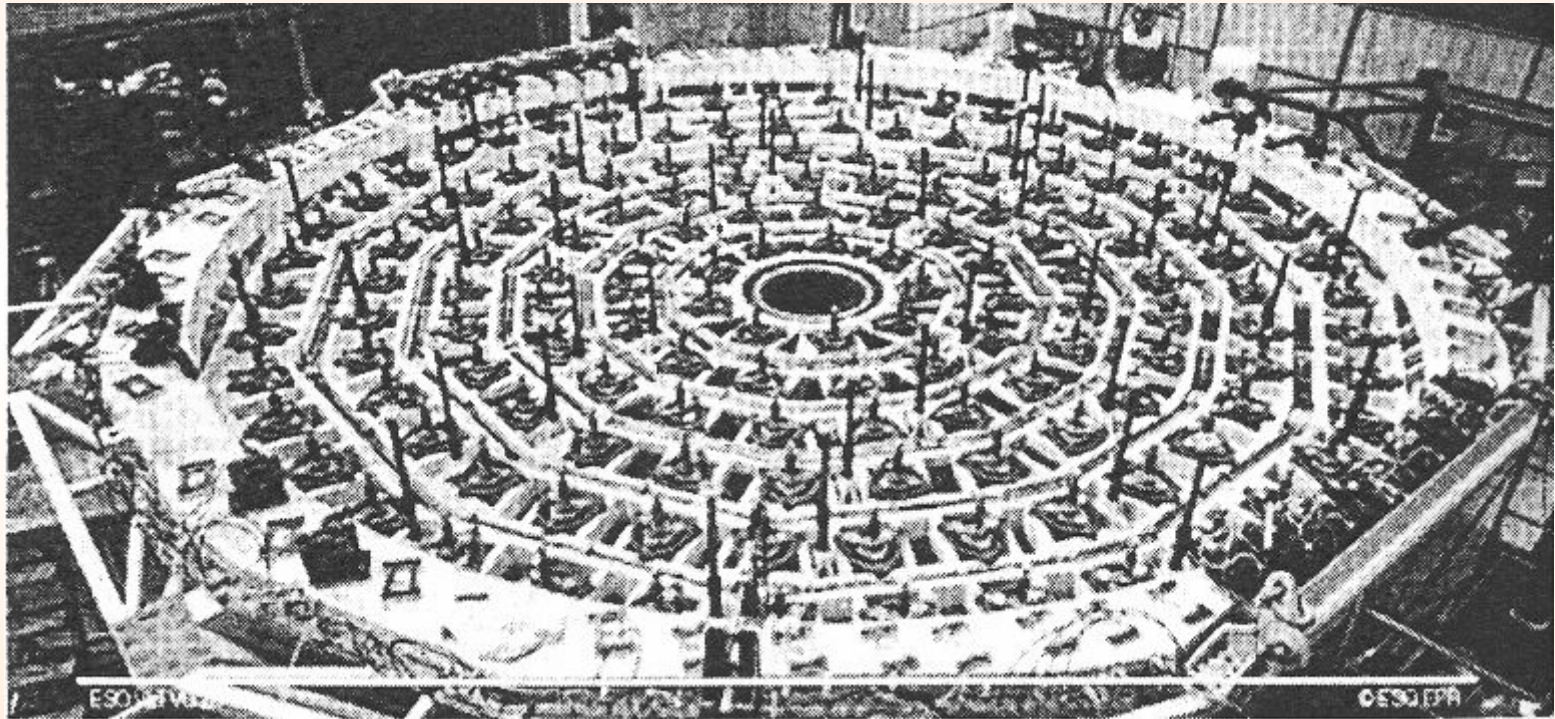
Голографический негатив, освещенный монохроматическим светом, дает полное трехмерное изображение, парящее в пространстве



Способ получения голограммы.

На фотопленку попадают как отраженный от предмета лазерный свет, так и опорный пучок от зеркала⁶⁷

4. Интерференционные волны от отдельных «элементарных» излучателей *используется при создании сложных излучающих систем* (антенн) для электромагнитных и акустических волн.



Оправа 8,2-метрового главного зеркала очень большого телескопа (VLT) Европейской южной обсерватории. В нижнюю поверхность зеркала упираются 150 управляемых «домкратов», которые по командам компьютера поддерживают форму зеркала в идеальном состоянии

В 1963 г. начал работать 300-метровый радиотелескоп со сферической антенной в Аресибо на острове Пуэрто-Рико, установленный в огромном естественном котловане, в горах. В 1976 г. на Северном Кавказе в России начал работать 600-метровый радиотелескоп РАТАН-600. Угловое разрешение радиотелескопа на волне 3 см составляет 10"



5. Просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров.

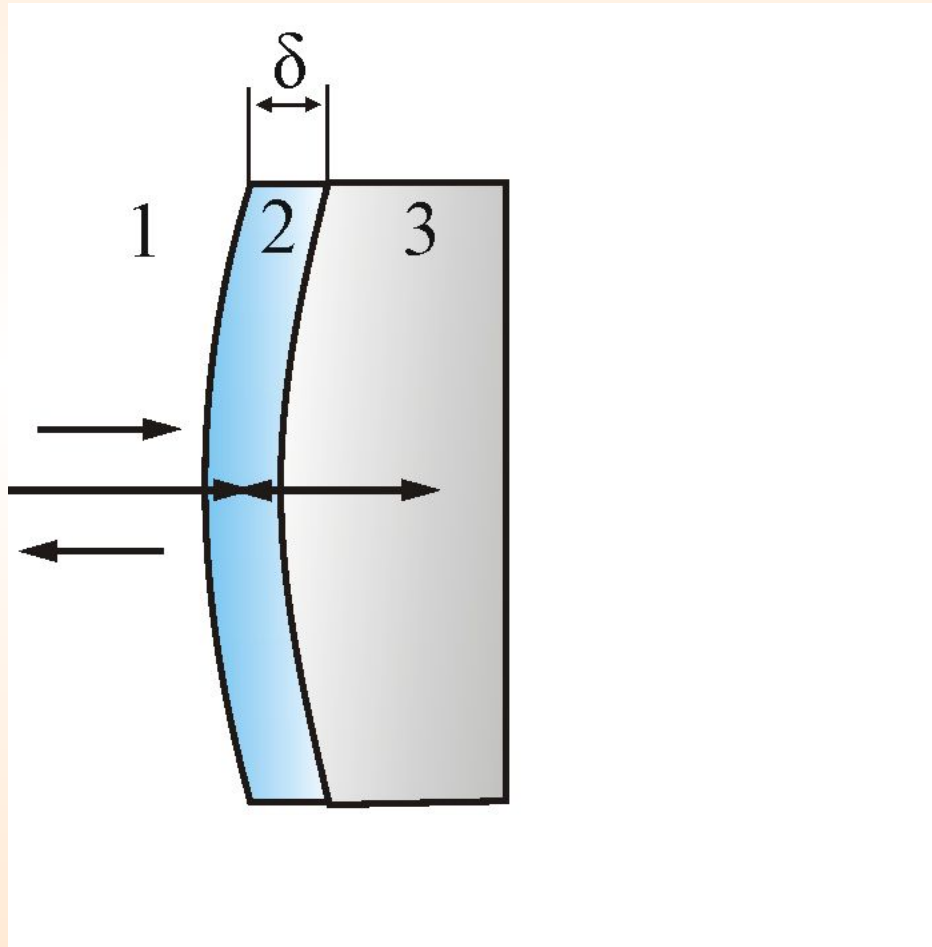
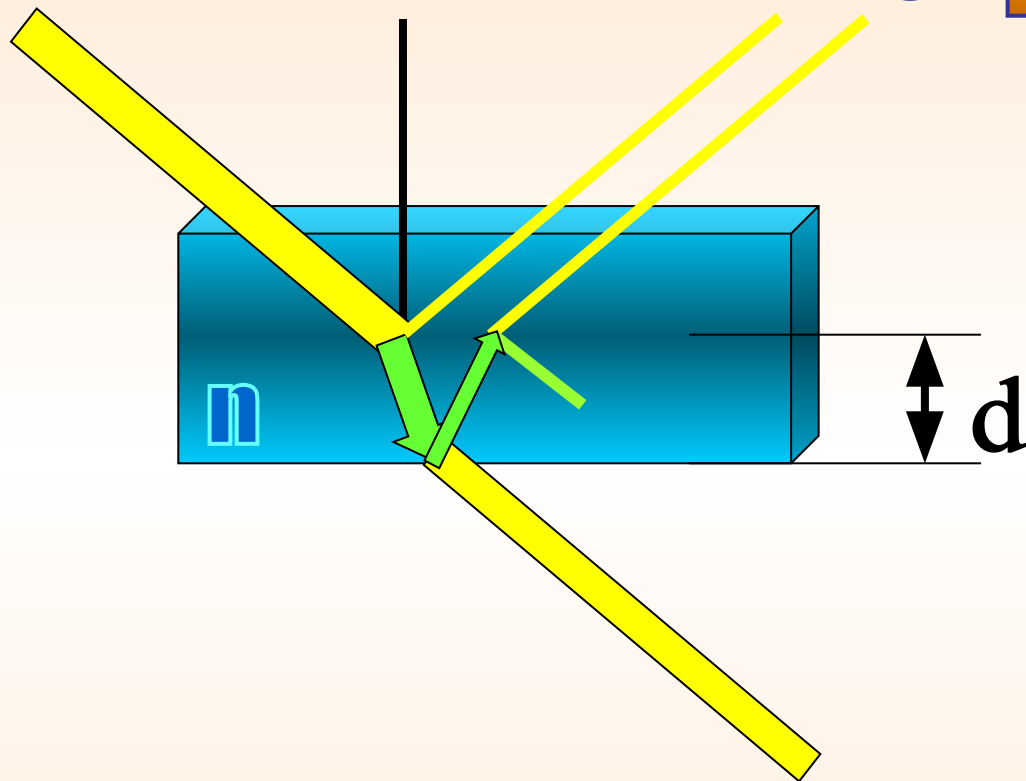


Рисунок 7.15

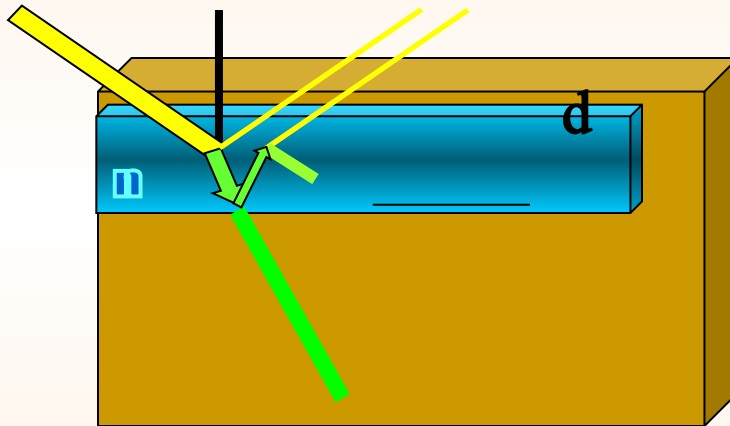
min отражения



тах пропускания!

Просветление линз и солнечных батарей

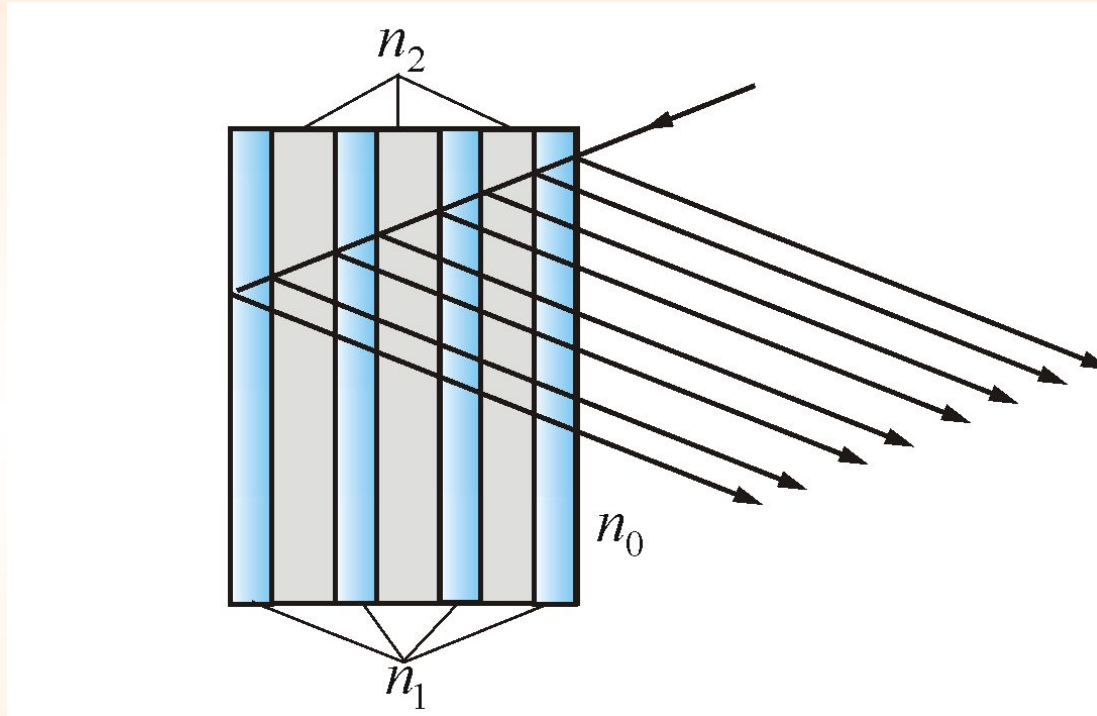
Мин интерференции



Тонкая пленка
ОКИСЛОВ

тах пропускания света в рабочий объем

6. *Получение высокоотражающих электрических зеркал*



Для получения коэффициента отражения $R = 0,99$ (такие зеркала используются в лазерных резонаторах) надо нанести 11 – 13 слоев.

Лекция окончена!

